

2. 研究開発項目毎の成果

2.1 アスベスト建材等の飛散・暴露を最小化する回収・除去技術

2.1.1 遠隔操作による革新的アスベスト除去ロボットの開発

開発概要

1. 遠隔操作による革新的アスベスト除去ロボットの開発

(1) 湿式系吹付けアスベスト含有建材除去ロボットの開発（フロア大空間用）

①剥離用アタッチメント装置の開発

剥離用アタッチメント装置の仕様を決定し、アスベストの粗取り用回転式剥離機（鉄筋針付）と仕上げ用回転式剥離機（樹脂製ブラシ）を併せ持つ、多機能型剥離用アタッチメント装置（各々の剥離機を180度反転させて使い分け）を開発した。また、低速で高トルク機能を持った駆動モータを装備した。

②実用規模試作機の製作、及び実証

遠隔操作の標準装備された既往のロボットアーム先端部に、試作した多機能型剥離用アタッチメント装置を装着して、アスベスト除去ロボットによる実験室での模擬吹付けアスベスト除去実験を行った。その結果、概ね15m²/h程度の除去速度を確保できることが判明した。

(2) 湿式系吹付けアスベスト含有建材回収システムの開発

①除去アスベスト移載装置の開発および実用規模試作機の製作、実証

ロボットのブレードによって掻き寄せられた除去アスベストを、効率良くコンベア装置に受け渡すための、ステージ型移載装置の仕様を決定した。また、試設計・試作した後、除去（模擬吹付け）アスベスト移送実験を行い、長尺ベルトコンベア連結部の滑落防止用カバーの設置などの対策を施して、円滑に移送できることを確認した。

②破碎装置の開発および実用規模試作機の製作、実証

2軸式のローリングカッターを使用した、ラス網等の金属片をも裁断することのできる破碎装置の仕様を決定した。また、試設計・試作した後、模擬吹付けアスベスト及びラス網による破碎実験を行い、破碎し切れなかった残骸物を振り分けすることのできる機能を追加することにより、円滑に破碎することができ、概ね1/3に廃棄アスベストを減容できることを確認した。

(3) 高度遠隔操作システムの開発

無線によりパソコン遠隔操作で移動させることのできる、クローラ型移動カメラ装置の仕様を決定した。監視カメラを3.5mの高さまで上昇させることのできるリフター機構や防汚用のワイパー機構、補助輪機構等を持たせることにより、明瞭で安定した遠隔監視操作ができることを確認した。

また、作業区域内のモニターカメラからの映像を、よりリアルにロボットオペレータに伝達するためのグラスモニターシステムを試行し、遠隔操作時の有効性を確認した。

(4) トータルシステムの現場実証試験

湿式系吹付けアスベスト含有建材回収システムを実際の工事現場に導入して実証試験を行い、安全対策の為の改良を行い、廃棄アスベスト等を概ね1/3に減容できることを検証した。

(5) エレベータシャフトへの適応拡大

①エレベータシャフト内昇降式除去ユニットの開発

(エレベータシャフト内アスベスト除去ロボットの開発)

3種類のセンサー（力センサー、カメラセンサー、立体センサー）を装着した、6軸多関節型の知能ロボットのアーム先端部に、粗取り用または仕上げ用の回転式剥離機を装着したアスベスト除去ロボットを製作した。また、4点ワイヤ吊りの為の巻取り機、エアブレーキ、ガイドローラーを装着した昇降ゴンドラ架台を試作した。そして、ロボットとゴンドラ架台を合体させた後、模擬エレベータシャフト実験室において除去実験を行った。その結果、概ね10m²/h程度（3回繰り返し時）の除去速度を確保できることが判明した。

2. 実用化に資する導入シナリオとビジネスモデルの策定

湿式系吹付けアスベスト無人化除去・回収システムの事業化に向けた、現状の湿式系吹付けアスベストの実態調査を行い、総合的な導入シナリオを策定した。

開発内容

第1章 湿式系吹付けアスベスト無人化除去・回収システムの基本構想

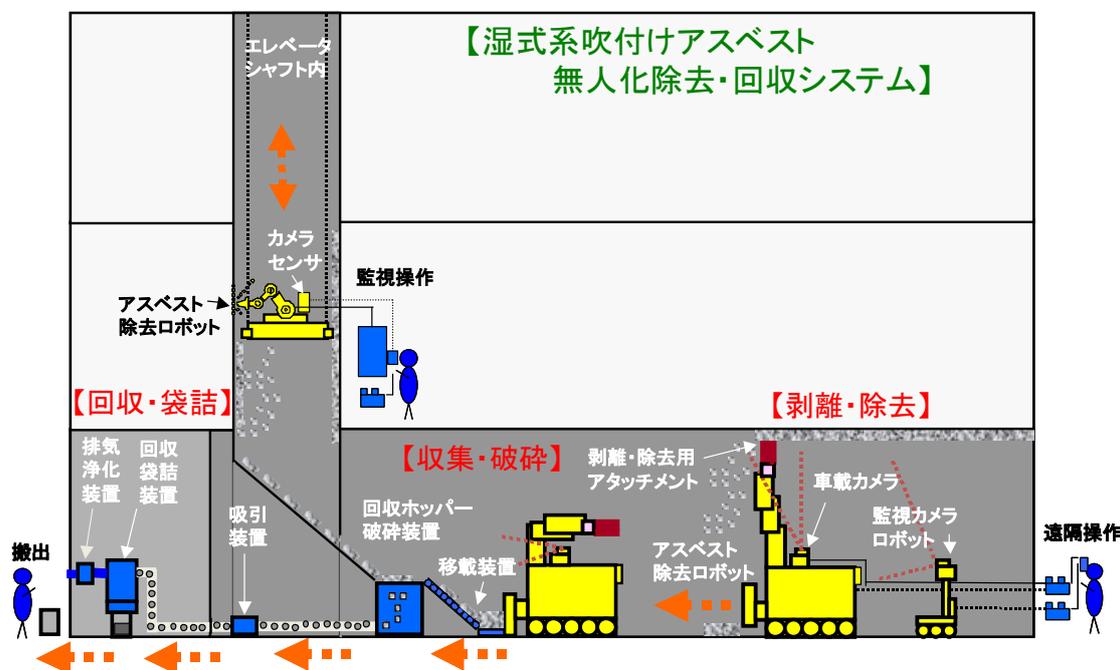


図 1-1 湿式系吹付けアスベスト無人化除去・回収システムの流れ

湿式系吹付けアスベスト無人化除去・回収システムの基本的なシステムフローを図 1-1 に示す。主な作業工程を以下に示す。

- ①車載カメラおよび監視カメラロボット等からの映像を見ながら、剥離・除去用アタッチメントを装着したロボットを遠隔操作して、建物各部位に吹付けられているアスベスト含有建材を剥離・除去する。(エレベータシャフト内のロボットは、予め除去動作をプログラミングにより教え込ませた上で、自動運転により剥離・除去する。)
- ↓
- ②ロボット付属のブレードで、床面上の剥離・除去したアスベストを掻き寄せる。
- ↓
- ③移載装置およびベルトコンベアを使って集めたアスベストを回収ホッパーに投入する。
- ↓
- ④破碎装置で塊状の除去アスベストを粉砕する。
- ↓
- ⑤バキューム装置で粉砕されたアスベストを回収装置まで圧送する。
- ↓
- ⑥回収・袋詰装置により、所定の回収袋にアスベストを自動で袋詰めする。

第2章 フロア大空間用湿式系吹付けアスベスト除去ロボットの開発

2-1 湿式系吹付けアスベスト除去ロボットベースマシン

湿式系吹付けアスベスト剥離・除去ロボットのベースマシンとして、先に乾式系吹付けアスベスト剥離・除去ロボット用として使用した、遠隔操作の標準装備されたスウェーデン製の解体装置を採用した。本装置の主な仕様を表 2-1 に示す。

本ロボットベースマシンは、3アーム構造で自由度が高く、電動モータを採用していることから、排気ガス等の配慮も必要としない。またコンパクトで小回りがきき、エレベータでの移動や階段の自走も可能となっている。

その外観を図 2-1 に示す。

表 2-1 ロボットベースマシンの主な仕様

寸法	
輸送時長さ (アタッチメント無し)	1821mm
輸送時高さ (最低)	1210mm
輸送時 幅 (最小)	780mm
輸送時 幅	1586mm
地面からのクリアランス	150mm
トラック幅	200mm
作業半径 (先端ツールによる)	3.6m
重量	
自重 (アタッチメント無し)	930kg
地面へのトラック圧力 (アタッチメント無し)	0.028MPa (0.29kg/cm ²)
先端ツール最大重量	120kg
性能	
上部回転速度	8sec/245°
最大移動速度	2.3km/h
バケット容量	0.055m ³
ブレーカー 一打あたりのエネルギー	255J (26.00kgf.m)
電動モータ	
出力	11kW
電圧	220-240V 380-420V
起動方法	ソフトスタート
油圧システム	
ポンプ形式	ギヤポンプ
油圧	16MPa (163.2kg/cm ²)
油量	40L/min
制御システム	
制御ユニット	遠隔操作ボックス
信号コード	デジタル
制御モード	ケーブル/無線



図 2-1 湿式系吹付けアスベスト除去ロボットベースマシン

2-2 湿式系吹付けアスベスト剥離用アタッチメント

アスベスト剥離用アタッチメントは、円筒状の回転体に複数の鉄筋針を櫛状に溶接した粗取り用の剥離機と、粗取り後の取り残しを磨き落とすため、複数の樹脂製ブラシを円筒状の回転体に取り付けた仕上げ用の剥離機で構成している。粗取り用と仕上げ用の剥離機は、同一の支持フレームに並行して取付け、油圧モータの回転軸に各々の剥離機の軸が脱着できるようにし、支持フレームを180度反転させて剥離機を交互に利用できるような機構とした。また、剥離機の駆動用油圧モータは、効率良く湿式吹付けアスベストを剥がし落とすことができるように、回転数とトルクを設定している。

写真 2-1 に、アスベスト剥離用アタッチメント取付け状況を示す。



写真 2-1 剥離用アタッチメント（粗取り用/仕上げ用）

2-3 車載用監視カメラ

ロボット胴体部に、湿式系吹付けアスベストの除去部位の映像を、リアルタイムで遠隔操作を行うオペレータのTVモニターに送信するため、2台の車載用監視カメラを設置した。

写真 2-2 に車載用監視カメラの設置状況を、また、表 2-2 に主な仕様を示す。



写真 2-2 監視カメラ

表 2-2 監視カメラの主な仕様

■一般仕様	
使用条件	屋外一般
設置条件	正立設置
使用電源	DC24V (22~26V)
電流	動作時 2.0A以下 (ピーク時3.5A参考値) 停止時 約0.8A
使用温度	-15℃~+45℃
使用湿度	90%以下 但し結露なきこと
防水性	JISC0920×5 (防噴流型) 及びIP65に準じる
リモコン形式	RS-485 シリアル信号
転送速度	9600bps
外装部材質	耐食アルミ合金及び合成樹脂
ワイパー	操作指令により2往復
デフロスト	前面ガラスはデフロスト、リモート強制ON/OFFサーモスイッチによる自動ON/OFF
近赤外線照明器	実用照射距離 約30m
質量	約5.4kg
■カメラ仕様	
信号形式	NTSC
撮像デバイス	1/4型 CCD固定撮像素子 総画素数38万画素 実効画素数724×494 約36万画素
解像度	水平480TV本以上 (中心部) 垂直400TV本以上 (中心部)
最低被写体照度	高感度機能 OFF時 3.0lx 高感度機能 ON時 0.03lx (白黒モード時)
■レンズ仕様	
ズーム比	光学23倍 電子ズーム4倍 (組み合わせ最大92倍に通常設定)
焦点距離	f = 3.6~82.8mm
ズーム動作速度	・マニュアル操作時 約3.5~7.8秒デフォルト約6.5秒 ・プリセット動作時 約1.6秒
フォーカス動作速度	・マニュアル操作時 約1.5~40秒デフォルト約8秒 ・プリセット動作時 約2秒以下 ・オートフォーカス時 約2~6秒 (W~T)
最至近距離	100mm (ワード端) ~1000mm (テレ端)
■旋回台仕様	
旋回角度	水平360° エンドレス 垂直+30° (上向き) ~-90° (真下)
旋回速度	水平部 マニュアル動作時 約0.2° /s (テレ側) ~約60° /s (ワイド端) プリセット動作時 約60° /s、90° /s、120° /s オートパン動作時 約3° /s~9° /s 垂直部 マニュアル動作時 約0.2° /s (テレ側) ~約30° /s (ワイド端) プリセット動作時 約30° /s、45° /s

第3章 エレベータシャフト用湿式系吹付けアスベスト除去ロボットの開発

3-1 湿式系吹付けアスベスト除去ロボットベースマシン

エレベータシャフト用の湿式系吹付けアスベスト除去ロボットベースマシンとして、フアナック社製の汎用性の高い、6軸垂直多関節形の智能ロボットを採用した。

ロボットベースマシンの外形および主な仕様を、写真3-1および表3-1に示す。

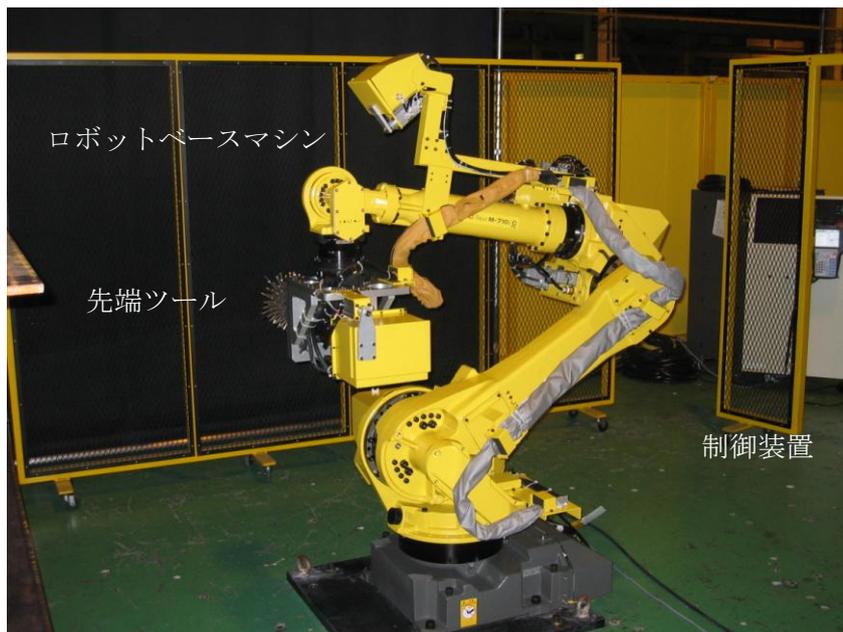


写真3-1 エレベータシャフト用アスベスト除去ロボットベースマシン

表3-1 ロボットベースマシンの主な仕様

項目		仕様
		M-710iC/70
動作形態		多関節形ロボット
制御軸		6軸 (J1、J2、J3、J4、J5、J6)
リーチ		2.05m
動作範囲 (最大動作速度)	J1軸回転	360° (160° /sec)
	J2軸回転	225° (120° /sec)
	J3軸回転	440° (120° /sec)
	J4軸手首回転	720° (225° /sec)
	J5軸手首振り	250° (225° /sec)
	J6軸手首回転	720° (225° /sec)
手首部可搬質量		最大70kg
駆動方式		ACサーボモータによる駆動
位置繰返し精度		±0.07mm
ロボット質量		約560kg
設置条件		周囲温度 : 0~45℃ 周囲湿度 : 通常75%RH以下 (結露しないこと) : 短期95%RH以下 (1ヶ月以内) 振動値 : 0.5G以下

3-2 湿式系吹付けアスベスト除去ロボット付属センサー

開発当初においては、フロア大空間用湿式吹付けアスベスト除去ロボットと同様の考え方により、エレベータシャフト内の吹付けアスベストを、図 3-1 の左側に示すように、監視カメラからの映像を、別室のオペレータが TV モニターを見ながら、ロボットを遠隔操作して除去する方式を取り入れる予定であった。しかしながら、ロボットベースマシンが、センサー類を搭載することで知能化でき、予め、アスベスト除去部位における動作データを教え込ませることで、ロボットの自己認識制御により、自動運転でアスベストを効率良く除去することができることから、アスベストを自己認識させるための各種センサー類を装備した。(図 3-1 の右側参照)

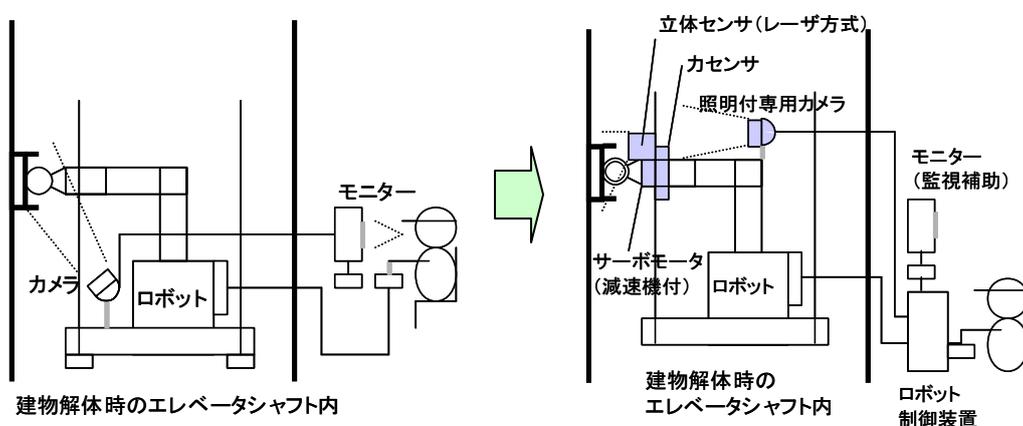


図 3-1 アスベスト除去ロボットの基本構成と各種センサー

(1) カセンサー

知能ロボット用として最適化したカセンサーで正確に感じ取った力を、知能化機能で制御して、熟練作業の力加減を再現することができる。(写真 3-2)

(*外形寸法：φ155×74.5mm、質量 3.2kg)



写真 3-2 カセンサー

(2) カメラパッケージセンサー (2次元)

カメラ、レンズ、カメラカバー、LED 照明を一体化しており、アスベストの除去状況等をパソコンの映像で確認することができる。(写真 3-3)

(*外形寸法：φ100×105.6mm、質量 0.76kg)



写真 3-3 カメラパッケージセンサー

(3) 立体センサー (3次元)

レーザ方式により、アスベストの付着状況を、3次元で認識することができる。

(*外形寸法：160×116mm、質量 0.9kg) (写真 3-4)



写真 3-4 立体センサー

3-3 湿式系吹付けアスベスト剥離用アタッチメント

フロア大空間用湿式系吹付けアスベスト除去ロボットの剥離用アタッチメントと同様に、円筒状の回転体に複数の鉄筋針を櫛状に溶接した粗取り用の剥離機と、粗取り後の取り残しを磨き落とすため、複数の樹脂製ブラシを円筒状の回転体に取り付けた仕上げ用の剥離機を製作した。

剥離機の機構・構造を図 3-2 に示す。また、外観を写真 3-5～3-6 に示す

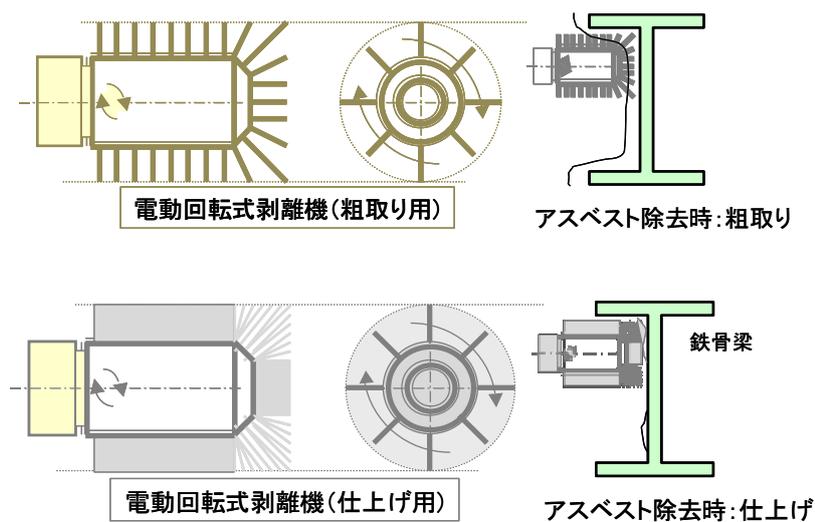


図 3-2 剥離機の構造（粗取り用/仕上げ用）

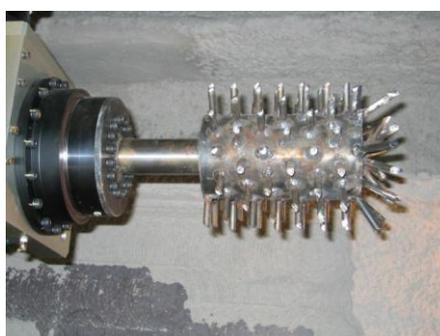


写真 3-5 粗取り用剥離機



写真 3-6 仕上げ用剥離機

3-4 昇降ゴンドラ架台装置

アスベスト除去ロボットをエレベータシャフト内で垂直方向に昇降させるための架台装置を製作した。このゴンドラ架台は、既存のエレベータカゴおよびカウンターウェイト用のガイドレールを有効利用して、垂直移動時の安定した軌道の確保や架台の固定に用いている。そのため、軌道を確保するためのガイドローラーおよび、ある所定の高さ位置でゴンドラ架台を固定するためのエア式の把持装置（ブレーキ）を取り付けている。また、このゴンドラ架台は4点式のワイヤで吊り下げる構造になっており、このワイヤ類を巻き取るためのワインダーを各々4台設置している。さらに、この架台は、エレベータシャフト内へスムーズに搬出入等を行うため、3分割できるような構造となっている。

その状況を写真3-7～3-8に示す。

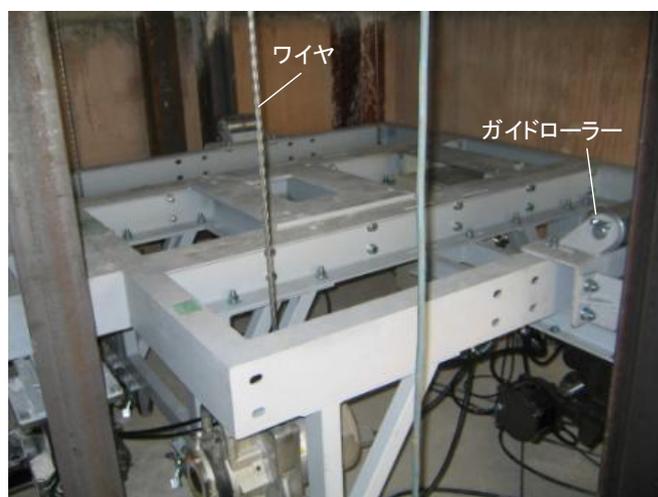


写真 3-7 昇降ゴンドラ架台装置（見下げ）



写真 3-8 昇降ゴンドラ架台装置（見上げ）

そこで、これまでのロボットベースマシンと昇降ゴンドラ架台を合体させて、模擬のエレベータシャフト実験室に設置したときの、エレベータシャフト用のアスベスト除去ロボットの外観を、写真 3-9 に示す。

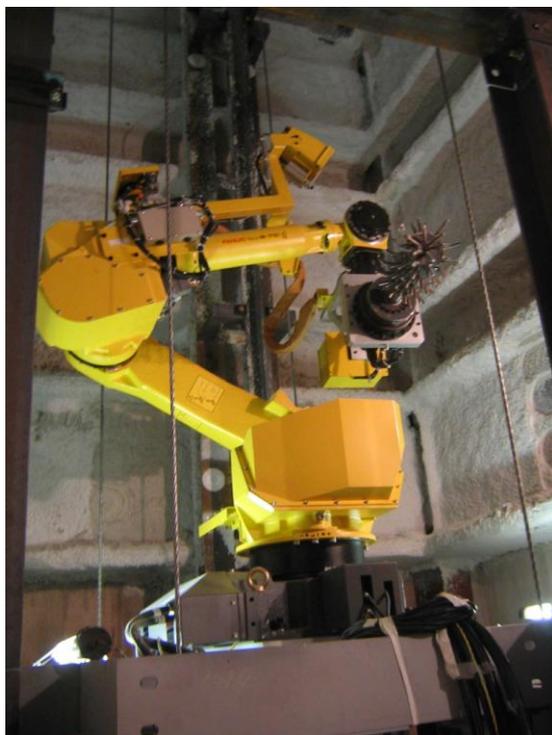


写真 3-9 エレベータシャフト用アスベスト除去ロボット外観

昇降ゴンドラ架台の 4 台のワイヤ巻取り機は、できる限り、ロボット自動運転でのアスベスト除去範囲が広げられるような位置に取り付けている。

また、アスベスト除去作業域の照度を確保するため、昇降ゴンドラ架台上部に照明器具を取り付けている。

第3章 湿式系吹付けアスベスト回収システムの開発

4-1 除去アスベスト移載装置

除去されて床面に散乱したアスベストをロボット付属のブレードで掻き集め、そのブレードで直接掻き寄せて所定のアスベスト回収用ホッパーまで移送するためのコンベアステージを設置した。そのステージにはブレードでベルトコンベアまで除去アスベストを載せるためのスロープが付いている。その外観を写真4-1～4-2に示す。



写真 4-1 移載装置 外観



写真 4-2 移載装置 (ロボット操作時)

4-2 除去アスベスト破砕装置

アスベスト除去ロボットが吹付けアスベスト下地面のラス網をも同時に剥がし落とす場合を考慮して、除去したアスベストだけでなく、ラス網等の金属類をも破断することができるような、2軸式のローリングカッターを搭載した破砕装置を設置した。また、破砕し切れなかった塊状の破砕物を選別するための振るい機構を組み込んだ。その外観を写真4-3～4-4に示す。



写真 4-3 破砕装置 外観



写真 4-4 破砕 (カッター) 部

4-3 除去アスベスト回収・袋詰装置【参考】

破碎された廃棄アスベスト等を所定の廃棄袋に圧送するためのバキューム装置を設置した。また、圧送されたアスベストを所定の廃棄袋に重量制御によって一定量袋詰め（1重）するための回収・袋詰装置を設置した。

各装置の外観を写真 4-5～4-6 に示す。



写真 4-5 バキューム装置



写真 4-6 回収・袋詰装置

第4章 高度遠隔操作システムの開発

5-1 無線式監視カメラ装置

アスベスト除去ロボットの作業区域の状況及びロボットアーム先端部の除去部位の確認を遠隔で行うために、無線式カメラ装置を配備した。この装置はクローラの上部にパンタグラフ式のリフターを取付け、その最上部に高感度カメラを設置している。パンタグラフ式のように、カメラ高さを最大で3.5mまで高くすることができる。監視カメラ装置の外観を写真5-1に示す。



写真 5-1 無線式監視カメラ装置 外観

(1) 主な仕様

1) 使用環境

- ①使用場所 屋内 ※アスベスト粉塵環境で使用する場合は別途保護カバーが必要
- ②使用環境 雰囲気：大気中
- ③使用温度 0～40℃ ※ベルト(ゴム)の最高使用温度：100～120℃
- ④湿度 結露無き事。
- ⑤保護等級 I P 5 4 相当

2) 機能

①走行性能

- ・平坦な舗装路（傾斜±3°以下）において直進走行（最大走行速度約 1.0 k m / h）が可能。
- ・平坦な舗装路（傾斜±3°以下）において超信地旋回（その場旋回）が可能。
（超信地旋回速度約 0.5 k m / h）
- ・走行可能な、段差高さはパンタグラフを畳んだ状態で 20mm 以下。
- ・幅 150mm 以上、高さ 50mm 以上の配管等の障害物をまたいで並走すると、本体底面と干渉して走行不能となる場合あり

②昇降機能

- ・昇降方式 パンタグラフ伸縮方式
- ・高さ 約 3.5m～約 0.9m（カメラ光軸基準）
- ・昇降速度 約 13 s e c

3) カメラユニット

- ・使用カメラ A X I S 製 A X I S 213
- ・カメラ仕様 最大画素数（30 万画素）、光学 26 倍ズーム、赤外線付（約 3m）
- ・コントロールソフトの画面にて、カメラのパン、チルト、ズーム操作が可能。
- ・カメラには、防振ゴムを取付け、ドーム形状のカバーにて防水・防塵保護。

4) サイズ

- ・長さ：約 860mm、幅：約 500mm
- ・高さ：約 990mm～約 3800mm（パンタグラフ昇降高さによる）

5) 質量

- ・60 k g ±5 k g（バッテリー1 台を含む）

(2) 無線LAN方式遠隔操作

下記の構成により、パソコンから本付属の操作ソフトで無線LAN方式遠隔操作を可能にしている。

1) マイコン：2 台

2) モータドライバ（H i B o t 製 10A D C P o w e r M o d u l e 等）：4 台

3) 無線LAN機器（8 0 2 . 1 1 b、8 0 2 . 1 1 g）：1 式

- ・上位パソコンの動作OSは、Microsoft Windows XP。
 - ・パソコンの画面解像度は1024×768ピクセル。
 - ・パソコンの動作保証スペック：CPU1GHz以上、メモリ512MB以上。
(推奨スペックは、CPU1.5GHz以上、メモリ1GB以上)
 - ・上位パソコンに取り付け可能なUSBアダプタを付属。
 - ・PCカード、もしくはパソコン内蔵型の無線LANでも可能。
- 4) 操作コントローラ (JOYPAD) : 1台
(上位パソコンに取り付けるJOYPADは、USB仕様)
- 5) 遠隔操作プログラム : 上位パソコンへのセットアップCD
- (3) 無線通信可能範囲
- ・無線の届く範囲 : 約15m (使用環境により変動する。)
- (4) バッテリ
- ・Ni-Mh バッテリ (24V9Ah) 2個
- (5) 充電器
- ・専用充電器 1台

5-2 グラスモニターシステム

ロボットを遠隔操作して湿式系吹付アスベストを除去する場合のグラスモニターシステム (視覚情報呈示装置) の適用検討を行った。ロボットを直接操作する場合とは異なり、遠隔操作の場合には得られる情報が意図的に与えられる、あるいは取得する情報に限られるので、遠隔操作ではロボット本体の性能 (操作性を含む) に加え、操作に必要な情報の提供方法も重要となる。

人間は特に視覚で得られる情報から様々なことを判断されているので、遠隔操作でも視覚情報の提供は必須で、ロボットを直接操作する場合と同様の視覚情報の呈示が望ましいと考えている。

遠隔操作の内容によって、呈示する視覚情報は異なり、今回のような湿式系吹付けアスベストを除去する場合は低コントラストの動画像 (複数) であり、手元作業を伴う遠隔操作 (写真5-2) であるため、複数の視覚情報 (手元状況を表現する動画像は含まない) を呈示装置上に表示する装置として、眼鏡型ディスプレイ (グラスモニターシステム) を試験的に評価した。



写真 5-2 ロボット遠隔操作（手元作業）

（1）手元作業を伴う遠隔操作用映像呈示装置の要件

写真 5-3 に示すような、5 台のカメラを用いて遠隔操作用視覚情報（以後、動画像とする）を得る。5 台の内訳はアスベスト除去ロボットに 2 台の車載カメラ、無線式監視カメラ装置に 3 台のカメラ（2 台はカメラ装置移動用）である。カメラの操作も手元作業で、個別の 3 つのコントローラで行う。



写真 5-3 ロボット遠隔操作を行うためのカメラ配置

遠隔操作するオペレータは、必要な動画像を得られるカメラを選び、そのカメラを操作して、動画像を見ながら遠隔でアスベスト除去ロボットを遠隔操作する。従って、オペレータは手元と動画像を見ながら遠隔操作を行う。モニターグラス上の動画像と手元を繰り返し見ることになるので、頻繁な焦点や瞳孔径の調節が必要になる。手元作業を伴う遠隔操作用視覚情報呈示装置の選定には、視覚疲労軽減の配慮が求められる。

今回のアスベスト除去ロボット遠隔操作のように、距離の把握が必要な場合は、立体視が望ましいが、立体視は視覚負担を増大させるため、今後の課題としている。なお、解体工事現場などでは下記のような条件が加わるために、多数のモニターを使うより、1 台の眼鏡型ディスプレイに動画像を切り替えて使うことが適している。

- ・空間が限定される
- ・使用できる電力量が限られる。

(3) アスベスト除去時の遠隔操作映像

前述のように、ロボットの遠隔操作で呈示される動画像は低コントラストである。作業場内は有彩色のものが非常に少なく、粉じんが舞う場合は、写真 5-4 に示すように低コントラストになる。白い粉じんが舞う環境では照度をあげると一層散乱が多くなり、コントラストが下がってしまうため、光環境の改善では動画像の質向上を図れない。コントラストの低い動画像は見にくいので、見まちがやすく、視覚疲労を伴いやすい。また、遠隔操作時にタイムラグを設けられないため、動画像の質をあげるための画像処理を加えられない。



写真 5-4 ロボット除去作業場内

(4) 眼鏡型ディスプレイ

眼鏡型ディスプレイは VR (バーチャルリアリティ) などで用いられる HMD (ヘッドマウントディスプレイ) の一種で、重量が軽いため首などに負担がかからない。没入型のものとシースルー型のものがある。

遠隔操作には集中できる没入型が適していると考えており、イメージスクリーンがより大きな没入型の眼鏡型ディスプレイ 2 種 (写真 5-4~5-5) を選定した。各仕様を表 5-1 に示す。共に目に相対する位置に 2 つの小さなディスプレイがあり、立体視対応である。A は液晶ディスプレイ、B は有機 EL ディスプレイである。

手元作業を伴い、手元の状況を呈示装置上に呈示しない場合は、眼鏡型ディスプレイを装着した状態で手元が見やすいかどうかは重要である。A を装着した状態で視線を上あるいは下に向ければ、写真 5-4 右の中央の帯状部分以外を見ることはできる。しかし、目が疲れる。B を装着すると、写真 5-5 右のように手で装置をずらさないと手元が見えない。



写真 5-4 眼鏡型ディスプレイ (A)



写真 5-5 眼鏡型ディスプレイ (B)

表 5-1 眼鏡型ディスプレイの主な仕様

	眼鏡型ディスプレイ	
	A	B
解像度	640*480	800*600
視野角	32°	対角40°
イメージスクリーンの大きさ	2.7m先に62インチ	3.6m先に105インチ
色数	1600万色	1677万色
重量	82.2 g	227 g
ディスプレイ	液晶ディスプレイ	有機ELパネル
トラッキングセンサー	内臓	内臓
眼球間距離 (IOD)	6.35 c m	調整可能
備考	瞳距離1.9 c m	
	プログレッシブスキャン搭載	
	更新速度60Hz	

(5) 実験方法

眼鏡型ディスプレイを用いた簡単なキーボード操作作業を行い、眼鏡型ディスプレイ A、B の視認性／操作性／視覚疲労を、5 人（表 5-3 の ID=1～5）で測定した。比較用ディスプレイとして、写真 5-6 に示すモニター 2 種も評価した。



写真 5-6 受像モニター比較

視認性測定では 16 色の無彩色が並ぶ（図 5-1 左側）中から、指定の色と同じ色の部分を選択する作業を課し、視認性（自己申告）とエラー数、所要時間を測定した。操作性では 81 個の「1」が並ぶリスト（図 5-2 左側）を、図 5-2 の右側のように 1～9 の数字が各 9 個並ぶように編集し、操作しやすさ（自己申告）と所要時間を測定した。視覚疲労は一連の作業後に、視覚疲労の自己申告と簡易的フリッカー装置（医療用具番号 62B0234）で測定した。視認性/操作性/視覚疲労に関する自己申告は表 5-2 に示す 4 レベルから、評価者各自の評価に最も近いものを選択した。

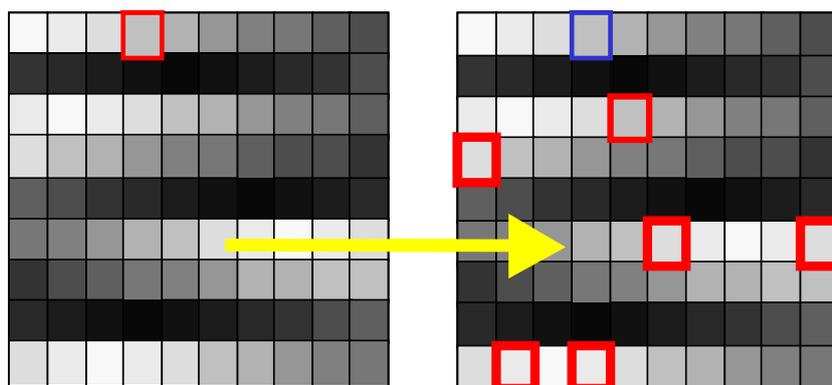


図 5-1 視認性実験呈示刺激

(左側：選択すべき色の指示、右側：選択後の例)

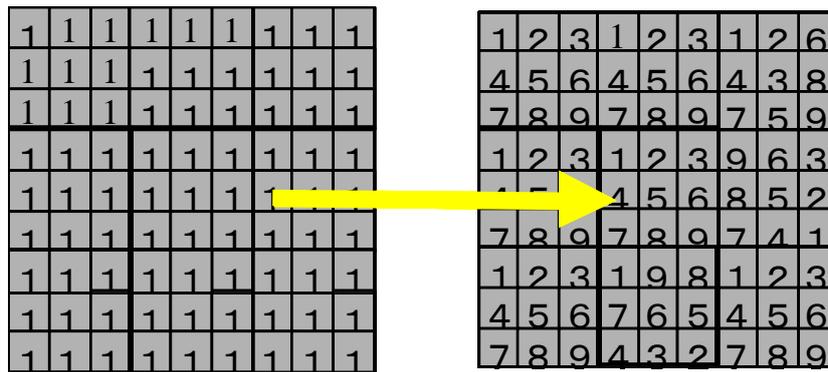


図 5-2 操作性実験呈示刺激
(左側：操作前、右側：操作後)

(6) 実験結果

表 5-3 に測定結果を示す。表中の「2>1=B」は 1 と B の望ましさは同じで、2 が最も望ましいことを示す。表 5-3 中の網掛けは眼鏡型ディスプレイ同士を比較した結果を表し、A の方が望ましい場合を薄い網掛けで、B の方が望ましい場合を濃い網掛けで示した。

操作性と視覚疲労の点で、モニターは眼鏡型ディスプレイよりも評価が高かった。このことから、眼鏡型ディスプレイを用いる場合は、操作性と視覚疲労低減の配慮が一層必要であることがわかる。

眼鏡型ディスプレイ同士の比較から、エラーが少なく、視認に要する時間が短く、視覚疲労の低い B の方が望ましいことがわかる。しかし、操作性の評価が低いので、B を用いる場合の手元作業は手元をあまり見なくてもよいような工夫が今後必要である。

表 5-2 視認性、操作性、視覚疲労の自己申告レベル

	1	2	3	4
視認性	見にくかった	やや見にくかった	やや見やすかった	見やすかった
操作性	操作しにくかった	やや操作しにくかった	やや操作しやすかった	操作しやすかった
視覚疲労	自覚なし	自覚あり (弱)	自覚あり	自覚あり (強)

表 5-3 視認性、操作性、視覚疲労の測定結果

ID	視認性			操作性		視覚疲労	
	申告	エラー数	所要時間	申告	所要時間	自覚	フリッカー
1	2>1=B	2<B<1	B<1<2	2=B>1	1<2<B	みな同じ	2>B>1
2	A>1=2>B	1=2<A<B	1<B<2<A	2=A>1=B	1<2<A<B	みな同じ	B>1>A>2
3	1=2=B>A	B<1=A<2	B<A<1<2	1=2>B>A	B<1<A<2	2<1<A=B	1>2>B>A
4	みな同じ	B<A<2<1	B<A<1<2	みな同じ	2<1<A<B	B<1=2=A	B>2>1>A
5	2>1>A>B	B<A<1<2	1<A<B<2	1=2>A>B	1<2<A<B	1=2<A<B	2>1>A>B

捕捉：ID=1の評価者は眼鏡の上に眼鏡型ディスプレイAを装着しての作業ができなかった。

(7) 考察

手元作業を伴う遠隔操作で、複数の視覚情報（手元状況を表現する動画像は含まない）を表示する装置として、眼鏡型ディスプレイ B が適していることがわかった。

今後の課題としては、長時間作業での視覚疲労を確認し、視覚疲労軽減のために操作者周囲の光環境を整え、手元作業のしやすさを向上させる予定である。



写真 5-7 眼鏡型ディスプレイ (B) の装着例

第5章 実験室実験

6-1 実験施設

湿式系吹付けアスベスト除去ロボットの除去性能およびアスベスト回収システムの回収性能について実験室での実験を行った。

(実験期間：2007年11月～2010年2月)

(1) フロア大空間用湿式系吹付けアスベスト除去ロボット

実験施設の概要を写真-4に示す。今回の除去・回収の対象物は、模擬吹付けアスベストとしてロックウールを使用し、施設内H型鋼の梁・柱部分：45mm厚、天井部分：20mm厚、壁部分：25mm厚で吹付け工事を行い、約3ヶ月の養生期間を経た後に実験を行った。

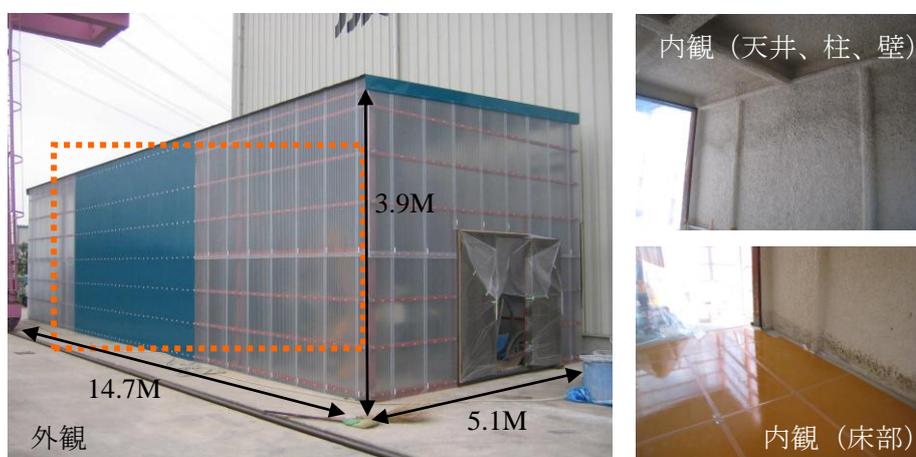


写真 6-1 実験施設 (フロア大空間用)

(2) エレベータシャフト用湿式系吹付けアスベスト除去ロボット

フロア大空間用のアスベスト除去ロボットの試験・評価を行った後、上述の実験施設を模擬のエレベータシャフトに改造した (写真 6-2)。施設内H型鋼の梁部分：45mm厚、壁部分：25mm厚で吹付け工事を行い、約3ヶ月の養生期間を経た後に実験を行った。



写真 6-2 実験施設 (エレベータシャフト用)

6-2 実験・評価

(1) 吹付けアスベスト剥離用アタッチメントの予備実験

湿式系の強固なアスベストを剥離・除去するための先端ツールの機構・構造を決定するため、従来の各方式による適用検討を行った。

① 高圧水噴射方式

平成 18 年度において開発した、乾式系吹付けアスベスト剥離用のアタッチメントが、そのまま、湿式系の強固なアスベストを剥離できるかについて、模擬の試験体を使用して、確認実験を行った。その実験状況を、写真 6-3 に示す。



使用水量	5.4L/min
吐出圧力	30-140kgf/cm ²
研削材	炭酸カルシウム、重曹等
吸水剤	高分子吸収剤

写真 6-3 高圧水噴射による除去状況

実験の結果より、高圧水（研磨剤混入）を試験体に噴射しても、試験体の表面を少しずつ均すに過ぎず、高速で剥離・除去させるには適していないことが判明した。

② 打撃チッパー方式

従来の手作業にてアスベスト除去を行う場合、写真 6-4 のような電動チッパーを使用していることが多く見受けられる。そこで、写真 6-5 のように、ロボットアームの先端部に、打撃式の大型電動チッパーを取り付けて、模擬の試験体を使用して、確認実験を行った。



写真 6-4 電動チッパー



写真 6-5 打撃式大型チッパー

実験の結果より、実際にロボットを遠隔操作して、剥離作業を行った場合、TV モニターを見ながら操作する作業員が、除去部位を位置決めするために多くの時間を費やしてしまうことが判明した。また、ロボット作業中は騒音・振動が激しいことから、剥離用アタッチメントとしては好ましいものではなかった。

③回転ブラシ方式

土木工事のトンネルを掘削するような、掘削刃のついた回転体によって剥離する方式が効果的であることを想定し、表 6-1 に示すような 3 種類の回転式剥離機を製作して、同一条件で模擬吹付けアスベスト剥離状況について確認実験を行った。

表 6-1 回転式剥離機構の比較

鉄筋針	硬質ワイヤ針	L型遠心羽根
		
回転盤側面部に一定間隔で先端部を斜めにカットした鉄筋針を溶接	回転盤側面部に衝突しても復元性のある硬質ワイヤを一定間隔でボルト締め	回転盤側面部にフリーの状態でのL型羽根を取付け回転した時に遠心力で剥離

実験の結果より、粗取り用の先端形状として硬質ワイヤ針を回転させた場合、10 分程度の剥離作業中にワイヤの復元力がなくなり、回転盤に沿うように湾曲してしまうことが判った。また遠心力を利用したL型羽根の場合は、叩き落としながら剥離する効果は大きいものの、羽根を吊り下げている軸部分の磨耗が激しく、危険を伴うため不適と判断した。溶接した鉄筋針を回転させた場合は、最も効率的に模擬吹付けアスベストを剥離することができた。

(2) フロア大空間用ロボットの遠隔操作による模擬吹付けアスベスト除去実験

①鉄筋針付の円盤回転式剥離機を横行装置に取り付けた場合

油圧モータの回転数を 50rpm、トルクを 250N・m(25kgf・m)のものを選定して、剥離装置に取付け、模擬吹付けアスベストの除去実験を行った。その除去状況を写真 6-6 に、除去後の壁面を写真 6-7 に示す。

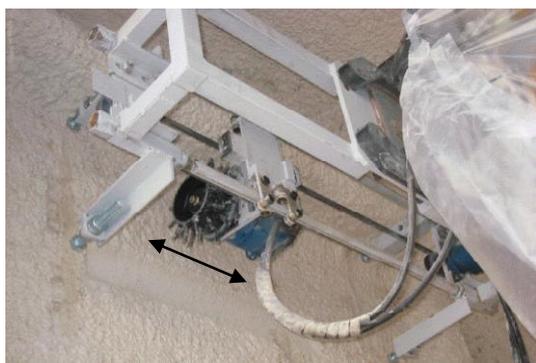


写真 6-6 模擬吹付けアスベスト除去実験状況 写真 6-7 除去後の壁面

除去実験結果から、30 秒間で約 0.08m² 除去できた(壁面部) ことより換算すると、除去速度としては、約 9.6m²/H (装置性能) であることが判明した。

②円筒型剥離機を取り付けた場合

円筒状の回転体に複数の鉄筋針を櫛状に溶接した粗取り用の剥離機を製作した。そして、アスベスト除去ロボットアーム先端部に剥離機を装着して、遠隔操作により、実験室内の壁面の模擬吹付けアスベスト(厚み 25mm) を剥離・除去した。その除去状況を写真 6-8 に、除去後の壁面を写真 6-9 に示す。

また、除去実験結果を表 6-2 に示す。



写真 6-8 模擬吹付けアスベスト除去実験状況 写真 6-9 除去後の壁面

表 6-2 模擬吹付けアスベスト除去実験結果

試行回数 (回)	除去面積 (縦×横) ^{*1} (m ²)	所要時間 (秒)	換算除去速度 ^{*2} (m ² /h)	推定除去速度 ^{*3} (m ² /h)
1	0.25 (0.5×0.5)	25	36.0	18.0
2	0.72 (1.2×0.6)	75	34.6	17.3
3	0.60 (1.5×0.4)	75	28.8	14.4
4	0.40 (1.0×0.4)	40	36.0	18.0
平均			33.9	17.0

*1: 壁面 (模擬アスベスト厚み: 25mm) の場合

*2: 除去部位のロボット移動等に要する時間は含んでいない

*3: 除去に要する時間にロボットの移動等の時間 (同所要時間と仮定) を考慮した場合

上表の実験結果より、壁面に吹付けられた湿式系模擬アスベスト (厚み 25mm 程度) の除去速度は、アスベスト除去ロボットの移動時間等を考慮しても概ね 15m²/h を確保することができた。これは人間の作業による除去速度の 3~5 倍程度に相当するものと考えられる。

また、写真 6-10 のように、仕上げ用の剥離機を使用することで、粗取り後の残骸物を円滑にブラッシングすることが確認できた。駆動モータの変更状況、および除去実験状況を、写真 6-11~6-12 に示す。



仕上げ用剥離機



ブラッシング状況

写真 6-10 粗取り後のブラッシング



回転数: 約 200 r p m
トルク: 約 25 k g f . m



回転数: 約 100 r p m
トルク: 約 57 k g f . m

写真 6-11 駆動モータの変更



写真 6-12 遠隔操作による除去実験状況

(2) エレベータシャフト用ロボットの遠隔操作による模擬吹付けアスベスト除去実験

①アスベスト除去ロボットの除去性能

模擬エレベータシャフト内にアスベスト除去ロボットを合体させた昇降ゴンドラ架台を据付け、予め模擬吹付けアスベストの除去位置を教え込ませ、また剥離速度や剥離機の回転数、押付力等を設定した上で、エレベータシャフトの所定の高さにおける、H鋼梁の前面部 (H900×350) →側面部 (H900×350) →背面部 (H600×200) の順で、自動運転による除去実験を行った。

粗取り時および仕上げ時のH型鋼梁部の状況を、写真 6-13 に示す。

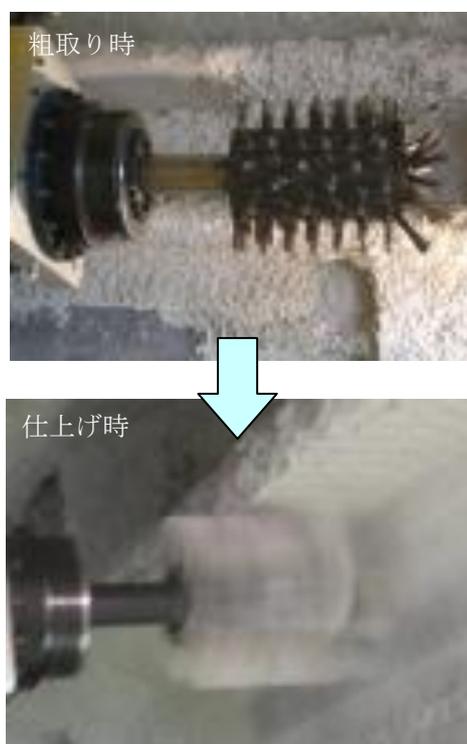


写真 6-13 模擬エレベータシャフト内除去実験状況 (H鋼梁部)

実験の結果より、模擬吹付けアスベストの粗取り時における除去速度としては、約 10m²/h（3回繰り返し時）を確保できることが判明した。

（3）アスベスト回収システムによる模擬吹付けアスベスト回収実験

コンベア装置によって移載され、その後破碎装置によって破碎し、減圧しながら袋詰めされた廃棄アスベストの減容化率について測定した結果を表 6-3 に示す。最終的に廃棄袋に袋詰めされる廃棄アスベストは、比重が約 0.65 となり、従来の塊状アスベストによる袋詰めよりも約 1/3 に減容化できることが判明した。破碎後の模擬吹付けアスベストの状況を写真 6-14 に示す。

表 6-3 模擬アスベスト回収実験結果（減容化率）

試行回数 (回)	破碎前	破碎後	減容化率 (換算値)
	同一容器内での重量(g)	同一容器内での重量(g)	
1	1466.5	3864.8	0.38
2	1406.2	4157.3	0.34
Ave.	1436.4	4011.1	0.36
測定状況			

* 同一容器内での水重量（測定値）：6136g



写真 6-14 破碎後の模擬吹付けアスベストの回収状況

第7章 現場実証試験

湿式系吹付けアスベスト回収システムを実際のアスベスト除去工事現場に試験導入し、実アスベストによるシステム装置類の運転動作を確認し、アスベスト廃棄物の減容効果を検証した。

7-1 現場実証概要

(1) 実証試験期間（装置類の据付準備および片付け等の期間を含む）

2009年6月1日～9月16日

(2) 実証試験場所

東京都内 某ビル解体工事

(3) 実証試験内容

- ・開発したアスベスト回収・減容システムを実際のアスベスト除去工事現場に試験的に導入し、運転動作の確認を行い、課題を整理するとともに、改善策の検討を行った。
- ・単位時間当りの処理量を評価した。
- ・開発したアスベスト回収・減容システムを実際のアスベスト除去工事現場に設置し、アスベスト回収・減容システムによる処理前後の廃棄物の容積を比較・評価した。

(4) 実証試験項目

① 廃ラス網処理

- ・まとまったラス網の廃棄袋の処理前の大まかな個数と容積を測定し、そして処理後の大まかな個数と容積を測定した。
- ・処理した延べ時間を測定した。

② 廃石綿処理

- ・まとまったアスベストの廃棄袋の処理前の大凡の個数と容積を測定し、そして処理後の大凡の個数と容積を測定した。
- ・処理した延べ時間を測定した。

7-2 実証試験・評価

(1) 実証試験準備

① システム装置類の搬入

工事現場内にシステム装置類の搬入を行った。搬入状況を以下に示す。



写真 7-1 システム装置類搬入



写真 7-2 システム装置類積み下ろし



写真 7-3 システム装置類配置

②システム装置類の設置場所

解体ビルの2階部分にアスベスト回収・減容システム専用の隔離養生ゾーン（レベル1）を設けた。（ビル内でアスベストを除去して一旦袋詰めされた廃棄袋を、その隔離室まで持ち込み、隔離室内で廃棄袋を解き、塊状のアスベストを破碎・吸引・減容して、再度袋詰めし、搬出した。）



写真 7-4 実証試験場所

③システム装置類の据付

前述の隔離養生ゾーン内に、アスベスト回収・減容システム装置類を搬入・設置した。設置システムの概要図を図 7-1～7-2 に、設置状況を写真 7-5 に示す。また、作業手順を図 7-3 に示す。

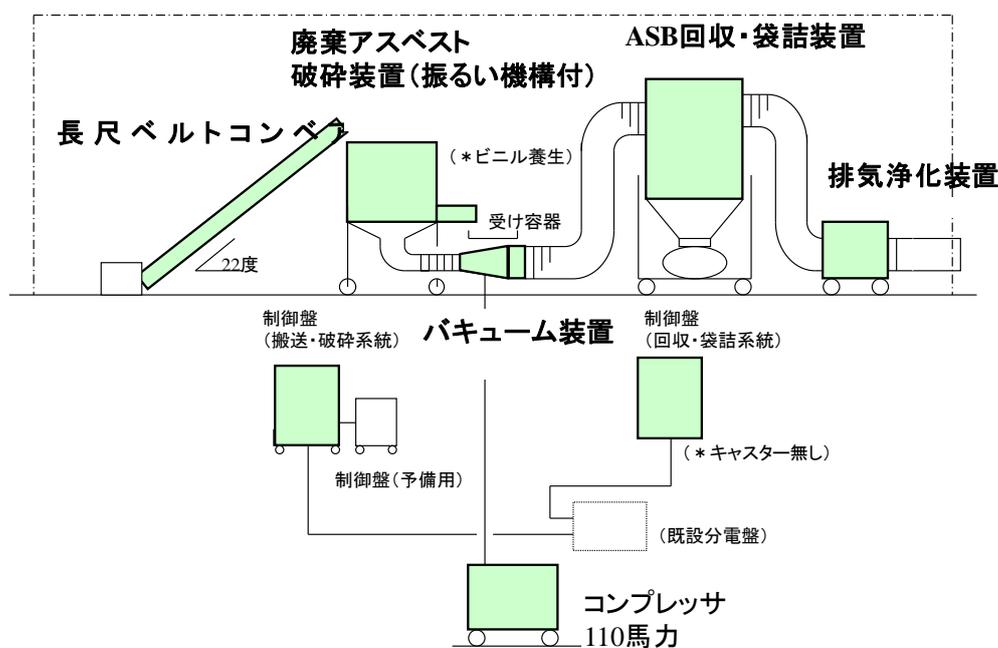


図 7-1 システム概要 (1)

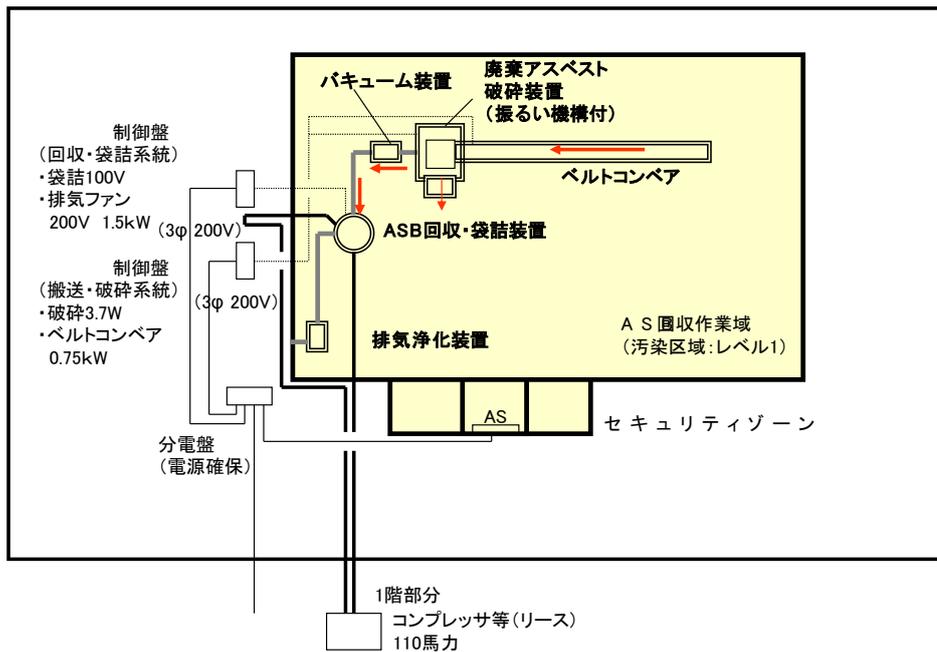


図 7-2 システム概要 (2)



写真 7-5 システム装置類の設置状況

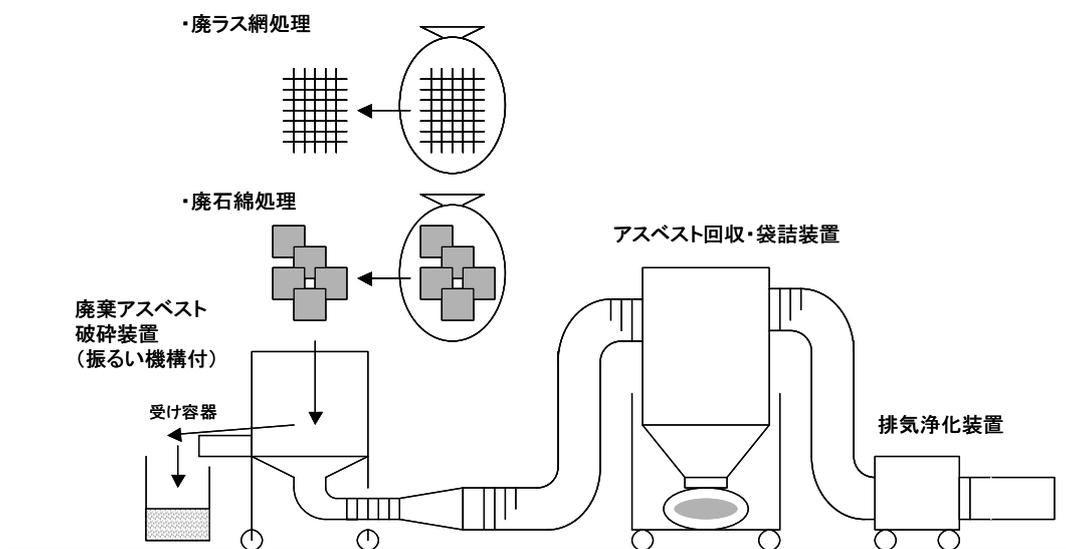


図 7-3 主な作業手順

(2) 実証試験状況

実証試験の作業状況およびシステム装置類の運転状況を以下に示す。



写真 7-6 コンベア装置にアスベスト廃棄物を投入



写真 7-7 アスベスト廃棄物を破砕装置に送り込み



写真 7-8 アスベスト廃棄物の裁断及び振り分け



写真 7-9 破碎後のアスベスト廃棄物の袋詰め

(3) 実証試験結果

写真 7-10 に示すような、アスベスト廃棄物を隔離養生エリア内に持ち込み、システム実証試験を行なった。



写真 7-10 アスベスト廃棄物（処理前の状況）

以下に、アスベスト廃棄物（廃石綿、ラス網）の、処理前後における廃棄袋（中袋）の数量の増減についての結果をグラフ化したものを図 7-4～7-5 に示す。また、処理前後の廃棄袋を比較したものを写真 7-11 に示す。

①ラス網 廃棄物の場合

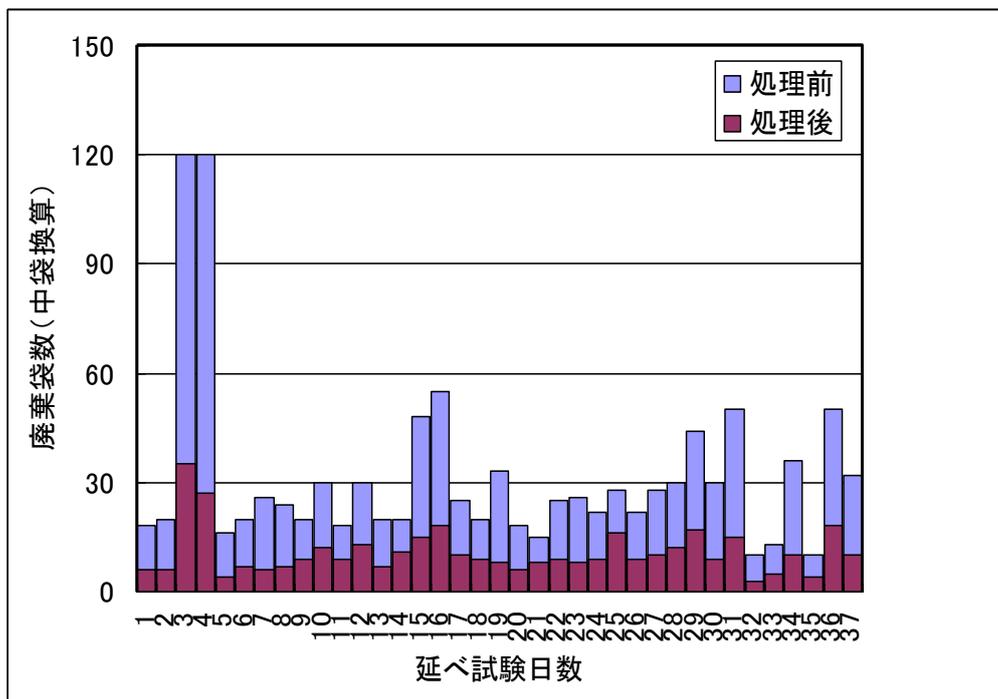


図 7-4 実証試験結果（廃棄物の減容率）

②廃石綿 廃棄物の場合

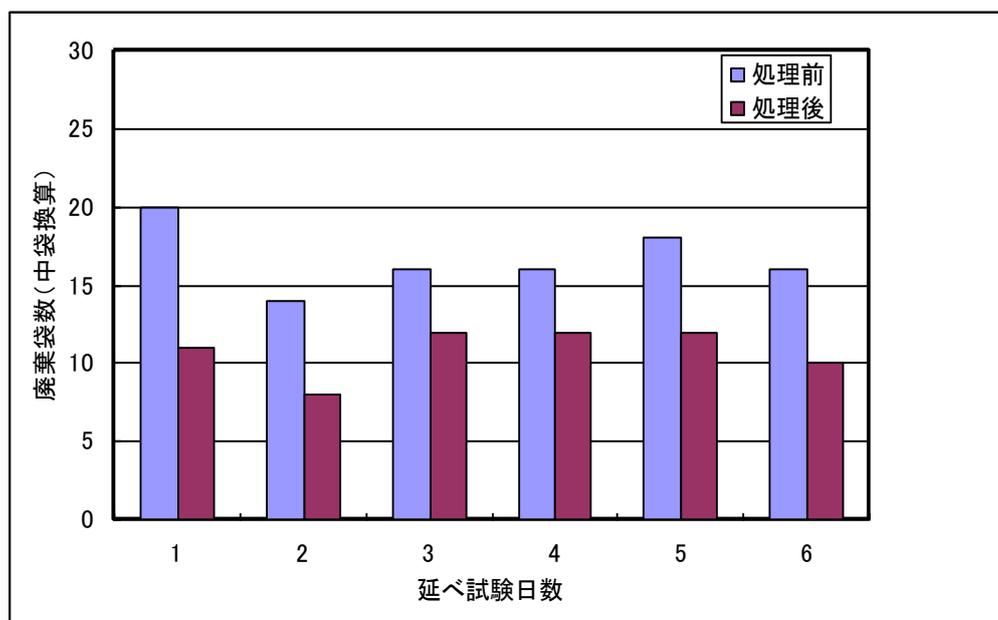


図 7-5 実証試験結果（廃棄物の減容率）



写真 7-11 実証試験結果（処理前後の状況）

（４）実証試験後の片付け

実証試験を終了後、アスベスト回収・減容システムの各装置ごとに高性能真空掃除機（高性能フィルター付）金属ブラシおよびウエス等を使用して、こびり付き等の無いよう、隅々まで十分な清掃を行なった。

実証試験後の片付け状況を以下に示す。

①コンベア搬送装置



写真 7-12 コンベア装置（清掃後）

②破碎装置



写真 7-13 破碎装置（清掃中）



写真 7-14 破碎装置 (清掃後)

③バキューム装置



写真 7-15 バキューム装置 (清掃後)

④回収・袋詰装置



写真 7-16 回収・袋詰装置 (清掃中)



写真 7-17 回収・袋詰装置 (清掃後)

⑤排気浄化装置



写真 7-18 排気浄化装置 (清掃後)

(5) 考察

今回の実証試験により、アスベスト回収・減容システムの効果について以下に整理した。

①アスベスト廃棄物の減容率

・廃ラス網の場合

平均値： $1-397/1172=0.64$ (64%)

(各日の変動幅：43～78%)

今回の破砕装置は、ラス網をも裁断することのできるカッターを装備していたこともあり、円滑に作業することができ、大凡 1/3 に減容できることを実証することができた。

・廃石綿の場合

平均値： $1-65/100=0.35$ (35%)

(各日の変動幅：25～45%)

今回の石綿種は、結果的には半乾式系に近かったこともあり、比較的軟質であったのに対して、今回使用した破砕装置は、強固な湿式系の塊状アスベストを破砕できるように、カッター等を選定していた為、破砕時の食いつきが悪く、廃石綿が絡みこむような状況となった。

今後は、廃石綿の種類に対して事前に調査し、フレキシブルにカッター等を交換できるような工夫が必要と考えられる。

今回の廃石綿の硬さとしては、ある程度柔らかいものではあったが、それでも結果的には 35%程度の減容化を確認することができた。おそらく、廃石綿がより強固な湿式系のものであれば、廃ラス網と同様に、1/3 程度の減容効果が得られるものと推測される。

②アスベスト廃棄物の袋詰作業時間

・廃ラス網の場合

平均値： 121.2 時間/397 体 (中袋) =0.3 時間

回収・減容したアスベスト廃棄物 (ラス網) を取り纏めるのに、大凡中袋 1 体あたり、0.3 時間 (18 分) の時間を要することが判った。

・廃石綿の場合

平均値： 32.5 時間/65 体 (中袋) =0.5 時間

回収・減容したアスベスト廃棄物 (廃石綿) を取り纏めるのに、大凡中袋 1 体あたり 0.5 時間 (30 分) の時間を要することが判った。

第8章 実用化に資する導入シナリオとビジネスモデルの策定

8-1 湿式系吹付けアスベスト実態調査

アスベスト含有湿式系吹付けロックウールは、ロックウール、石綿、セメント、水等を調合、混練して、圧送装置で吹付けた耐火被覆材である。(以下湿式系吹付けアスベストという)

乾式系および半乾式系のアスベスト含有吹付けロックウールの耐火被覆材は、下記のような欠点があった。(以下、乾式系吹付けアスベストという)

- ① 吹付け時に飛散し易い
- ② 吹き付け後のコテ押え時、押え具合によって比重にムラが生じるため、品質管理が難しい
- ③ 揚重、養生が大変である
- ④ 表面が柔らかくもろい

湿式系吹付けアスベストは、これらの欠点を改善し、施工時に埃がでにくく、高層階への圧送が容易となった為、特に昭和 50 年代後半、比較的延べ床面積の大きい高層ビルや、対流の発生があつて剥離しやすい、エレベータシャフト等に多く採用された。

当時の主な湿式系吹付けアスベスト製品は、下記、表 8-1 のとおりである。

(尚、表 8-1 は国土交通省の Web サイトに掲載されている石綿含有建材データベースの検索結果と社団法人日本作業環境測定協会発行『建築物の解体等に係る石綿飛散防止対策マニュアル』に掲載される表を基に作成したものである。)

表 8-1 湿式系吹付けアスベスト製品

No.	製品名	社名 (製造時)	製造時期	石綿含有率 (%)	石綿種類
1	トムウェット	日本アスベスト㈱	S45 (1970) ~ S62 (1987)	1~5	白
2	ATM-120	同上	S53 (1978) ~ S62 (1987)	1~5	白
3	プロベストウェット	朝日石綿工業㈱	S47 (1972) ~ S62 (1987)	4.8	白
4	バルカウエット	日本リンペット工業㈱	S48 (1973) ~ S62 (1987)	5以下	白
5	サンウエット	日本ゴム㈱	S47頃 (1972頃) ~ S50頃 (1975頃)	不明	白
6	アサノスプレーコート	日本セメント㈱	S48 (1973) ~ H1 (1989)	3~12	白
7	スプレーウェット	日東紡績㈱	S49 (1974) ~ S62 (1987)	4~5	白

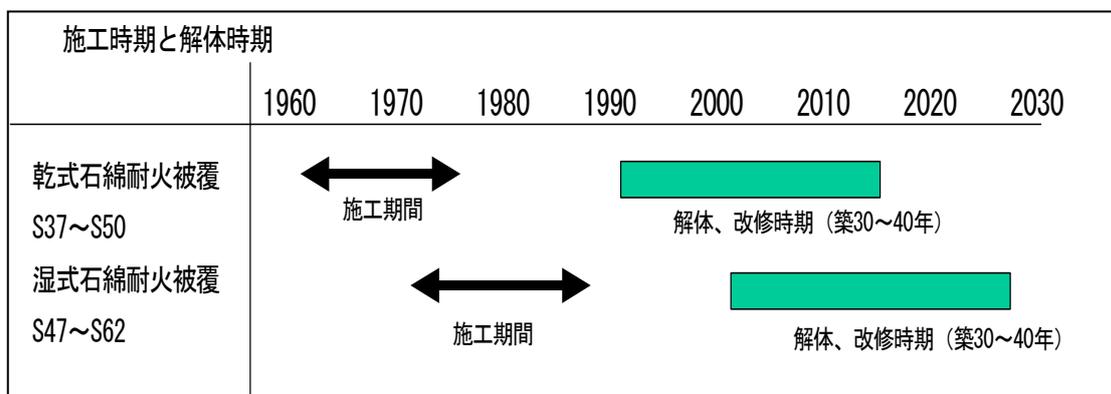
(1) 施工時期と解体時期

上記の表 8-1 の結果、製造期間は昭和 45 年から平成元年までである。大半の業者は昭和 62 年(1989)までに生産を中止している。

生産時期から鑑みて、おおよそ昭和 47 年～昭和 62 年（1987 年）頃が施工時期と考えられる。施工されてから今日まで約 30 年以上が経過し、初期に施工された多くの物件は、リニューアル時期を迎えようとしている。（表 8-2）

湿式吹付けは前述したように、高層階への圧送が容易という利点から、多くが高層ビル等の大型物件に施工されており、小規模な除去業者が工事を手がけにくいこと、建物も解体されずに施工当時の状態で現存しているものがほとんどであることから、乾式系吹付けアスベストの場合と比べて解体、除去により撤去された割合は低いと考えられる。

表 8-2 施工時期と解体時期



（2）賦存量の推計

乾式系吹付けアスベストと湿式系吹付けアスベストに区別された施工量の統計に関する資料が無い場合、断言することは出来ないが、大よそ施工面積は 3800 万 m²となる。

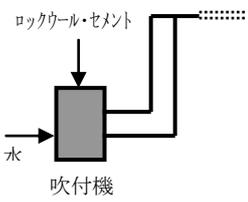
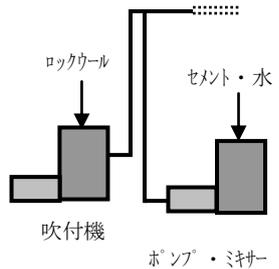
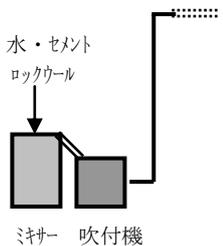
また、吹付け量は、吹付け厚さ 50 mm前後を標準にし、仕上がり比重を 0.5 と仮定すると約 95 万トンと推測される。

（3）乾式系と湿式系の相違

乾式系吹付けアスベストと湿式系吹付けアスベストの最大の違いは吹付け方法にある。この相違が施工後の硬さ等、夫々の特徴に影響している。

以下、乾式系吹付けアスベストと湿式系吹付けアスベストの相違について表 8-3 に示す。

表 8-3 乾式系／半乾式系／湿式系吹付けアスベスト比較

項目	乾式系吹付け	半乾式系吹付け	湿式系吹付け
比重 (g/cm ³)	0.3	0.3	0.45～0.7
材料の特徴 粉塵飛散 施工中 施工後 表面の硬さ コテ仕上の要否 乾燥時間	多い 多い 柔らかい 要 12 時間	比較的少ない 少ない 比較的硬い 要 12 時間	少ない 少ない 硬い 不要 (左官仕上可能) 48 時間
運搬揚重	<ul style="list-style-type: none"> • 材料を施工階まで揚げて吹付け • 揚程 25m程度 	<ul style="list-style-type: none"> • 地上階にプラントを設置し、セメントスラリーはポンプ、ロックウールはフロアで送る • 揚程 200m 	<ul style="list-style-type: none"> • 地上階にミキサー、ポンプを設置して施工階へポンプアップ • 揚程 200m 

(4) 湿式系吹付けアスベストの配合、物性、構造

①配合

一般的に、セメントをバインダー、ロックウールを骨材としていることは各メーカー共通しているが、その他の配合については異なる。

以下、表 8-4 にメーカー別の配合比を示す。

(尚、表 8-4 は 1997 年 3 月の建築技術『湿式吹付けロックウール耐火被覆の問題点』に掲載されているメーカー別配合組成表の抜粋である。)

表 8-4 メーカー別配合組成表

(重量%)

社名	バインダー		骨材				増粘剤等
	セメント	石膏	ロックウール	石綿	ひる石	その他	
①日本アスベスト	34		40	5	20		1
②朝日石綿	20 (20)	(20)	50 (35)	10 (10)	(20)	20	10 (0.3)
③日本バルカー工業	30		40	5		25	[3.02]
④日本ゴム	30		35	10		24.5	0.5
⑤日本セメント	35		55	10			1

※ () は初期から改良がなされ 1977 年時点での配合比

②物性

湿式系吹付けアスベストと乾式系吹付けアスベスト、および ALC、コンクリートの物性を比較したものを表 8-5 に示す。

表 8-5 物性比較表 (4 週強度)

項目	乾式吹付け	湿式吹付け	ALC	コンクリート
密度 kg/m ³ (気乾状態)	300 以上	450~700	600	2300
圧縮強度 N/m ² (kgf/c m ²)	—	0.5 程度 (5 程度)	3.92 (40)	21.4 (210)
曲げ強度 N/m ² (kgf/c m ²)	—	0.5 程度 (5 程度)	0.98 (10)	—
せん断強度 N/m ² (kgf/c m ²)	—	—	0.49 (5)	2.1 (21)
引張強度 N/m ² (kgf/c m ²)	—	—	0.49 (5)	2.1 (21)
付着力 N/m ² (kgf/c m ²)	0.013 以上 (0.13 以上)	0.02~0.04 (0.2~0.4)	—	—

③構造図（例）

湿式系吹付けアスベストの主な施工構造としては、直接鉄骨等に吹付け、ラスを下地材にした吹付け、合成被覆鉄骨吹付けの3パターンが挙げられる。

以下、代表的な施工構造3例と特殊なケースを図8-1～8-4に示す。

A) 鉄骨吹付け（柱・梁）

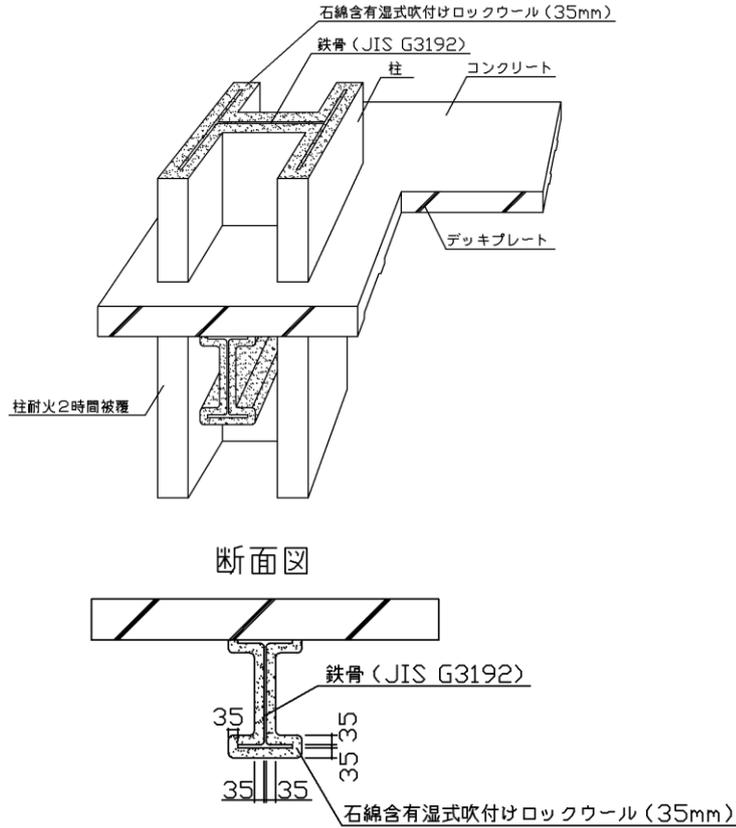


図8-1 施工構造例（1）

B) ラス下地吹付け（梁）

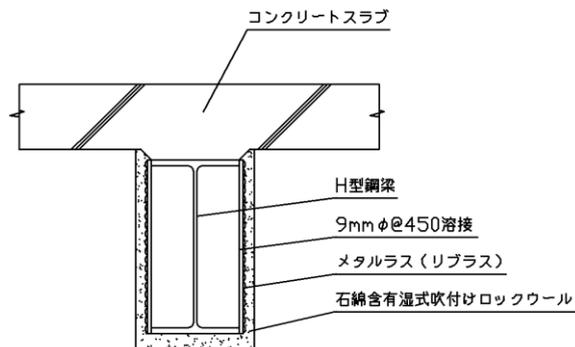


図8-2 施工構造例（2）

C) 合成被覆鉄骨吹付け (梁)

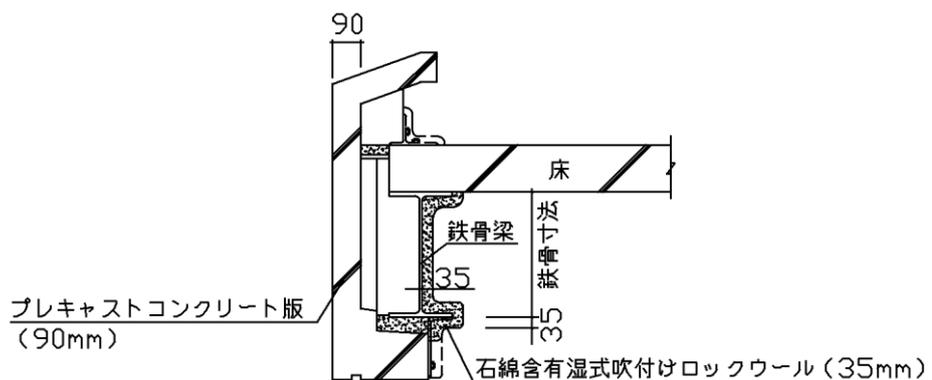


図 8-3 施工構造例 (3)

D) 特殊な例 (成形板の押さえとして亜鉛メッキ鉄線を釘止め)

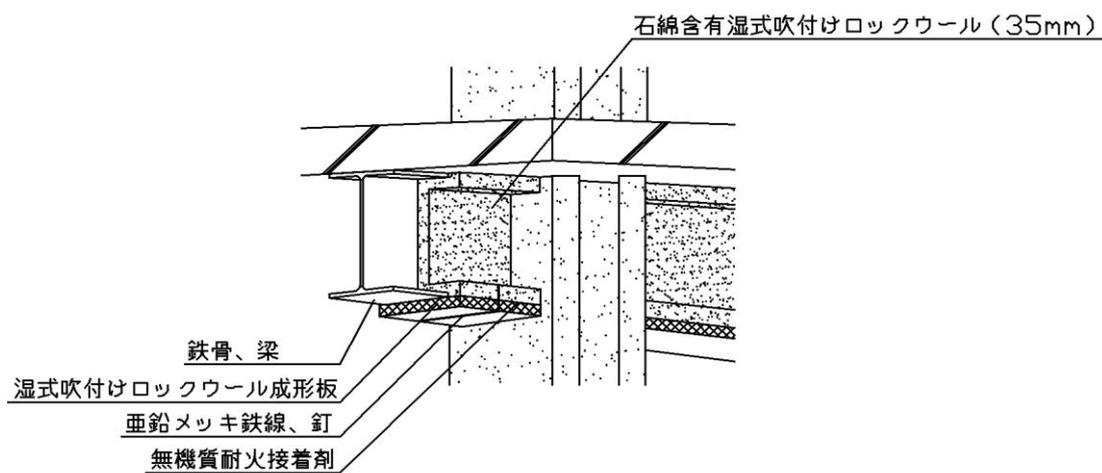


図 8-4 施工構造例 (4)

8-2 実用化に向けた導入シナリオとビジネスモデル展開

本研究開発で得られた成果（湿式系吹付けアスベスト無人化除去・回収工法）については、大手アスベスト処理業者と連携をとりながら、全国の支店、事業所、営業所等に今回の開発技術情報を発信する。そして、国内ネットワークによる各支店、事業所、営業所等からの案件情報により、アスベスト除去工事を必要とする工事案件をリストアップする。そして各案件の工事期間、工事場所、アスベスト処理面積等を確認した上で、実用機の持ち回りによるスケジュールを策定し、可能な限り積極的に適用できるような導入計画を立てる。その導入計画に基づいて、アスベスト除去工事案件に実用機を導入し、新規の無人化工法による湿式系吹付けアスベストの除去・回収作業を実施する。

また、湿式系吹付けアスベスト剥離・除去ロボットおよびアスベスト回収システム装置類については、機械装置リース業者が、工事案件毎に実用機（機械装置類）をリース展開する予定である。

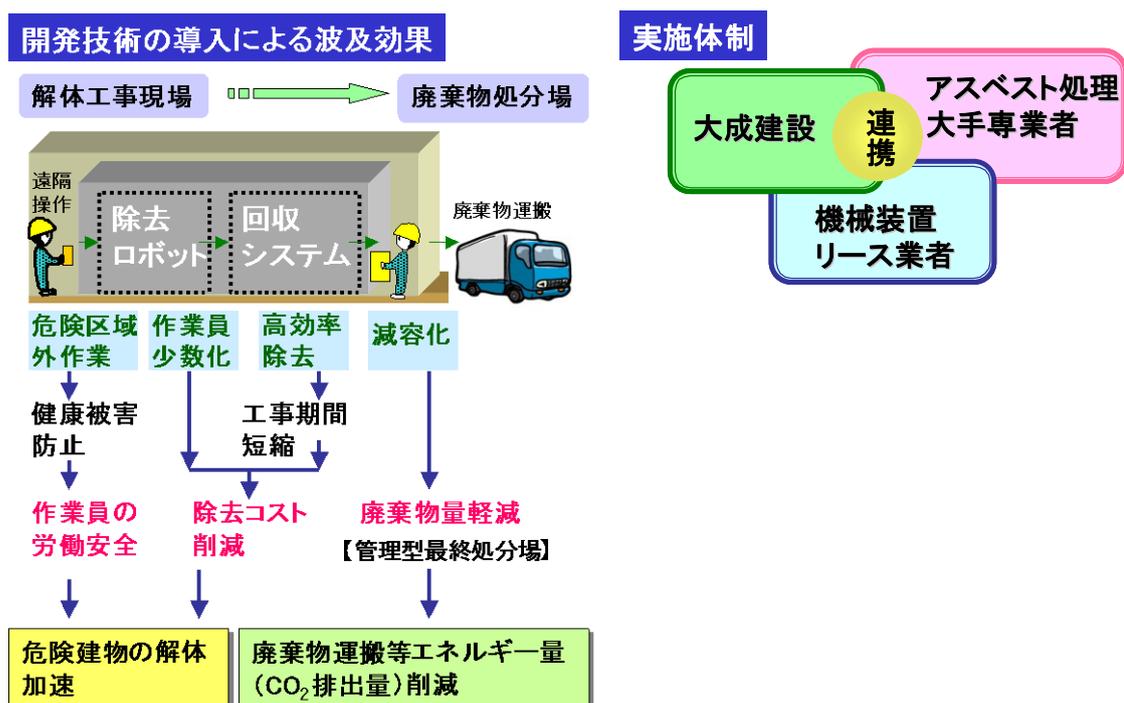


図 8-5 ビジネスモデルの波及効果と実施体制

■研究発表・講演、文献、特許等の状況

【平成 19 年度】

(1) 研究発表・講演

●学会・シンポジウム・セミナー・フォーラム発表 4 件

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2007年8月31日	日本建築学会	乾式系吹付けアスベストの無人化除去・回収システムの開発 (その1)	森直樹
2007年8月31日	日本建築学会	乾式系吹付けアスベストの無人化除去・回収システムの開発 (その2)	大山能永
2008年3月13日	日本建築学会	遠隔操作による乾式系吹付けアスベスト除去ロボットの開発	森直樹
2008年2月2日	日本大学桜建会 第 218 回定例会	建物の安全解体技術：乾式系吹付けアスベスト除去・回収システムの開発	長瀬公一

(2) 特許出願等

なし

(3) 受賞実績

なし

(4) その他特記事項

成果普及の努力 (プレス発表等)

●新聞発表 10 件

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	備考
2007年 4月 2日	産経新聞	8 面 アスベスト除去ロボ	作業員の安全確保、省力化
2007年 4月19日	日刊建設産業新聞	2 面 遠隔操作で石綿除去・回収	作業員の安全性を向上、実案件への適用めざす
2007年 8月29日	日経産業新聞	13 面 遠隔操作で効率良く	—
2007年 9月23日	朝日新聞	7 面 石綿除去するロボット開発	—
2007年10月12日	建通新聞	8 面 NEDO アスベスト対策開発プロジェクト	安全で効率的な処理秘術の開発を推進
2007年10月29日	日刊建設工業新聞	— 遠隔操作でアスベスト除去	ロボット開発にめど
2007年10月29日	日刊建設通信新聞	— 遠隔操作ロボで乾式石綿除去	高圧水噴射、剥離・回収
2007年10月31日	化学工業日報	— アスベスト無人化除去・回収システム	工期短縮、省コスト効果 実証
2007年11月28日	日刊工業新聞	14 面 ロボット最前線：ゼネコンの石綿除去関連ロボ	安全性・作業効率で成果
2008年 1月11日	日経産業新聞	8 面 アスベスト除去ロボット (日経アーキテクチャ)	石綿除去技術開発盛ん

●TV メディア発表 1 件

発表年月日	発表媒体		発表タイトル	備考
2007年10月27日	NHK	全国ニュース	アスベスト除去ロボット	実証試験はじまる

●論文投稿 4 件

発表年月	発表媒体	発表タイトル
2007年4月	日本建築学会	乾式系吹付けアスベストの無人化除去・回収システムの開発 (その1)
2007年4月	日本建築学会	乾式系吹付けアスベストの無人化除去・回収システムの開発 (その2)
2007年8月	日本建設機械化協会	建物解体時の乾式系吹付けアスベスト無人化除去・回収システムの開発
2008年2月	日本建築学会建築生産自動化小委員会	遠隔操作による乾式系吹付けアスベスト除去ロボットの開発

●雑誌投稿 6 件

発表年月	発表媒体	発表タイトル
2007年9月号	月刊「地球環境」	遠隔操作で無人化施工を実現 乾式系吹付けアスベスト除去ロボット開発
2008年1月号	月刊「コンクリート工学」	建物の安全解体技術：アスベスト自動化除去技術
2007年12月	大成建設技術センター報 第40号	ロボットを使った乾式系吹付けアスベスト除去・回収
2008年4月号	大成建設「たいせい」社報	遠隔操作ロボットによって、吹付けアスベストを除去・回収
2007年6月	大成建設「CSR 報告書」	アスベスト無人化除去・回収システム
2008年3月	月刊「建設機械」(予定)	建物解体時の乾式系吹付けアスベスト無人化除去・回収システムの開発

●書籍 (取材対応) 2 件

発表年月	発表タイトル	発表媒体
2007年11月	2007 年版アスベスト調査・処理市場の現状と将来展望	(株)矢野経済研究所
2008年2月	2008 年 企業向けサービスロボットの導入ユーザーの評価と今後の市場	(株)ロボットメディア

【平成 20 年度】

(1) 研究発表・講演

●学会・シンポジウム・ 세미나・フォーラム発表 4 件

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2008年9月18日	日本建築学会	湿式系吹付けアスベストの無人化除去・回収システムの開発	森 直樹
2008年10月17日	日本建設機械化協会	乾式系吹付けアスベスト除去ロボットの開発実証	森 直樹
2009年2月4日	NEDO 技術開発機構	遠隔操作による革新的アスベスト除去ロボットの開発	家田高好
2009年2月23日	日本建設機械化協会九州支部	乾式系吹付けアスベスト除去ロボットの開発実証	森 直樹

(2) 特許出願等

1 件：「アスベスト含有建材剥離装置」

・出願日 : 平成 20 年 10 月 3 日

・出願番号：特願 2008-258911 (出願人：大成建設株式会社)

(3) 受賞実績

1 件：社団法人 日本建設機械化協会主催

・2008 年 10 月 「平成 20 年度 建設施工と建設機械シンポジウム」

優秀論文賞 受賞

(4) その他特記事項

成果普及の努力 (プレス発表等)

●新聞発表 1 件

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	備考
2009年3月17日	日本経済新聞 (夕刊) 1 面	アスベスト除去「爆弾」触れずに速く	ロボット新景

●論文投稿 3 件

投稿年月	発表媒体	発表タイトル
2008年4月	日本建築学会大会論文集	湿式系吹付けアスベストの無人化除去・回収システムの開発
2008年6月	日本建築学会技術報告集	乾式系吹付けアスベスト無人化除去・回収システムの開発
2008年6月	日本建設機械化協会	乾式系吹付けアスベスト除去ロボットの開発・実証

●雑誌投稿 3件

掲載年月	発表媒体	発表タイトル
2008年9月号	月刊「地球環境」	遠隔操作の乾式系吹付けアスベスト除去ロボット開発 実用レベルの性能確認ビル建て替え需要増追い風に
2008年9月号	月刊「建設機械」	建物解体時の乾式系吹付けアスベスト無人化除去・回収システムの開発
2008年11月号	月刊「資源環境対策」	吹付けアスベスト無人化除去・回収システム

●展示会等 1件

開催年月日	発表媒体	展示内容等
2008年10月8日 ～2008年10月 10日	アスベスト対策環境展08	開発成果の報告（小セミナー）、システム模型等

【平成21年度】

(1) 研究発表・講演

●学会・シンポジウム・ 세미나・フォーラム発表 3件

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2009年8月29日	日本建築学会	湿式系吹付けアスベストの無人化除去・回収システムの開発（その2）	森 直樹
2009年8月29日	日本建築学会	湿式系吹付けアスベストの無人化除去・回収システムの開発（その3）	大山能永
2010年1月28日	日本建築学会小委員会	湿式系吹付けアスベストの無人化除去・回収システムの開発	森 直樹

(2) 特許出願等

1件：「アスベスト含有建材除去装置」

・出願日：平成21年8月7日

・出願番号：特願2009-183975（出願人：大成建設株式会社）

(3) 受賞実績

なし

(4) その他特記事項

成果普及の努力（プレス発表等）

●新聞発表 12件

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	備考
2009年5月29日	日経産業新聞	—	日本のロボット産業

2009年9月8日	日経産業新聞	—	エレベータシャフト内アスベスト除去ロボットの開発	
2010年2月19日	建設通信新聞	—	エレベータシャフト内の石綿ロボット使い安全除去	
2010年2月19日	化学工業日報	—	アスベスト除去ロボット開発	
2010年2月19日	鉄鋼新聞	—	エレベータシャフト内アスベスト除去ロボット	
2010年2月22日	日刊工業新聞	—	エレベータシャフト内アスベストを自動除去	
2010年2月24日	電気新聞	—	エレベータシャフト内アスベスト除去ロボット	
2010年2月26日	建設産業新聞	2面	エレベータシャフト内アスベスト除去作業 知能ロボットで無人化	
2010年2月26日	建設工業新聞	2面	エレベータシャフト内のアスベスト除去 知的ロボットで完全無人化	
2010年3月2日	建設通信新聞	3面	エレベータシャフト内石綿除去ロボ 作業効率は3倍	
2010年3月12日	日本経済新聞(夕刊)	3面	アスベスト ロボが除去	
2010年4月8日	日経産業新聞	17面	エレベータシャフトの石綿除去ロボ	

●ラジオメディア発表 1件

発表年月日	発表媒体		発表タイトル	備考
2009年10月5日	NHK	国際ラジオ放送 18ヶ国語配信	アスベスト除去ロボット関連	

●論文投稿 3件

投稿年月	発表媒体	発表タイトル
2009年4月	日本建築学会	湿式系吹付けアスベストの無人化除去・回収システムの開発 (その2)
2009年4月	日本建築学会	湿式系吹付けアスベストの無人化除去・回収システムの開発 (その3)
2009年12月	日本建築学会小委員会	湿式系吹付けアスベストの無人化除去・回収システムの開発

●雑誌投稿 2件

掲載年月	発表媒体	発表タイトル
2009年9月号	月刊「地球環境」	遠隔操作による湿式系吹付けアスベスト除去
2009年秋号	季刊「建築施工単価」	アスベスト処理・対策の現況と課題

●展示会等 2件

開催年月日	展示会	展示内容等
2009年10月21-23日	アスベスト対策環境展09	開発成果の報告（小セミナー）、システム模型等
2009年12月10-12日	エコプロダクツ展	システム模型等、技術説明

【平成19年度～平成21年度集計】

(1) 研究発表・講演

●学会・シンポジウム・セミナー・フォーラム発表 11件

(2) 特許出願等

●特許出願 2件

(3) 受賞実績

●平成20年度「建設施工と建設機械シンポジウム」優秀論文賞 受賞 1件

(4) その他特記事項

●新聞発表 23件

●TVラジオメディア発表 2件

●論文投稿 10件

●雑誌・書籍投稿 13件

●展示会等 3件

2. 1. 2 高性能アスベスト剥離・回収・梱包クローズ型処理ロボットの開発

開発概要

鉄骨等に吹付けられた湿式アスベストを安全に効率よく除去するため、自走式昇降台車に搭載した 7 自由度マニピュレータ、マニピュレータを囲う部分チャンバ、剥離装置および剥離物を吸引して圧縮・梱包する回収・梱包システム等から構成されるクローズ型剥離処理システムを開発し、開発にあたり設定した以下の目標値を達成した。

- (a) 単位時間あたりの作業面積が従来の人手による作業の 4 倍以上の作業効率
- (b) 自動、手動による剥離作業後の剥離残しが剥離対象面積の 5% 以内
- (c) 部分チャンバ外の環境がファイバ数 0.1 本/cm^3 以下
- (d) 剥離したアスベストの体積を 1/3 以下に減容化

1) 剥離ロボットの開発

自走式昇降台車に搭載した 7 自由度マニピュレータにより高さ 5.5m までの剥離作業に対応でき、マニピュレータシミュレーションソフトを利用したオフラインティーチングによる自動操作と、ジョイスティックによる手動操作を行える遠隔操作システムおよび鉄骨のジョイント部や鉄骨を貫通するダクト等の障害物の自動回避機能を開発した。遠隔操作における作業確認のために剥離ロボットにカメラを搭載した。

2) 剥離装置の開発

各種工具による剥離実験を行って粗剥離から仕上げまで工具交換なしで剥離可能な回転研削型の剥離工具を選定し、剥離粉碎したパウダー状のアスベストを後述するバキューム吸引するための集塵カバーを取り付けた剥離装置を開発した。また、自走式昇降台車上に設置した大型モータからフレキシブルシャフトにより回転ワイヤブラシを駆動する駆動装置を開発し、剥離装置の剥離速度、剥離厚さ等の性能向上と小型・軽量化を図った。

3) 回収・梱包装置の開発

剥離粉碎したパウダー状のアスベストを集塵カバーからバキューム吸引し、粉塵を飛散させることなく分離して梱包するために、吸引・分離・梱包の各機能に対する装置の仕様検討を行うとともに装置を試作して性能比較実験等を実施し、自動で連続運転可能なクローズ型の回収・梱包装置を開発した。

4) 剥離実証実験

アスベスト代替のロックウールを吹付けた実大規模の鉄骨梁モックアップを屋内実験場に設置し、試作したクローズ型処理ロボットシステムによる剥離実証実験を実施して、パソコンによる遠隔自動操作で湿式吹付けロックウールの剥離から吸引・分離・梱包までの一連の除去作業を、粉塵を発生させることなく連続的に行えることを確認した。

5) ビジネスモデルの策定

アスベスト除去現場の調査を行ってシミュレーションのためのモデル現場を設定し、剥

離実証実験結果に基づいた作業フローおよびロボットと人手の最適な作業分担等を設定してシミュレーションを行い、本開発システムを適用した場合のコスト、工期および作業員削減による安全性向上等について検討した。また、ロボット販売・メンテナンス会社、リース会社、アスベスト除去工事会社等の協力を得て、ロボット適用による効率向上・コスト等の試算および事業化体制案の策定を行った。

開発内容

1. 開発システムの概要

1.1 ニーズと目標

鉄骨等の湿式吹付けアスベスト処理ロボットシステムに求められているニーズと対応する要求性能を図 1.1-1 に示す。ニーズは大きく分けて安全・安心、ローコスト・短工期、リニューアル工事への対応の 3 つがあり、作業項目ごとに必要な性能を、要求性能としてまとめると、安全・安心に関連する事項としては主に粉塵飛散の防止、人手作業の削減などがあり、ローコスト・短工期に関連する事項は高い作業効率、剥離アスベストの減容化などがあり、リニューアル対応に関連する事項は主に狭く複雑な場所への対応、構造物に損傷を与えないなどがある。

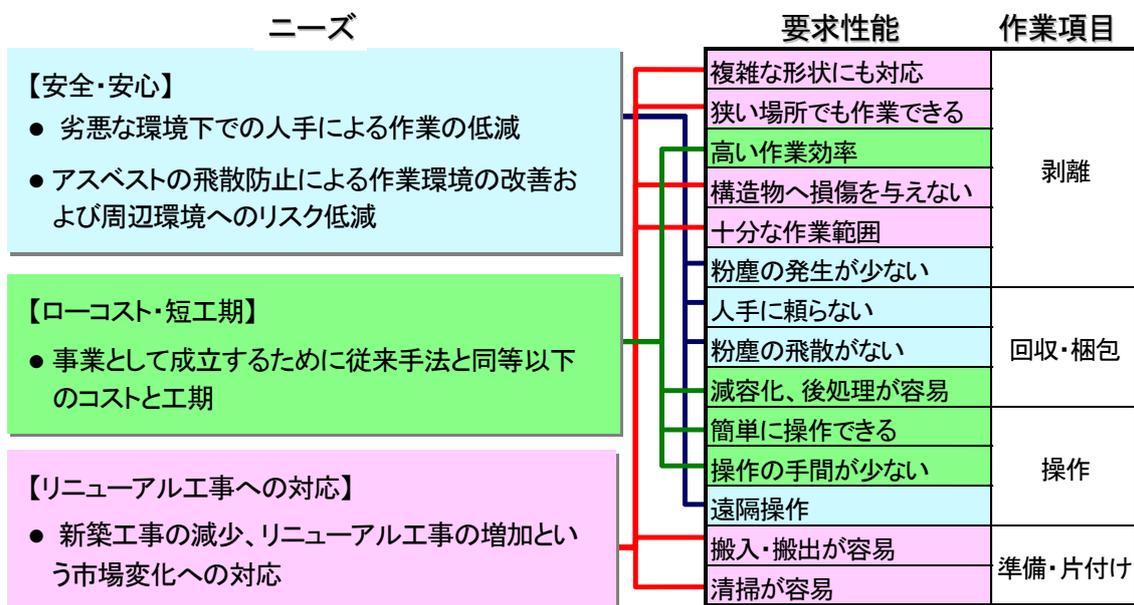


図 1.1-1 システム開発のニーズと要求性能

要求性能のうちコスト・工期に特に関連の強いロボット作業による作業効率と剥離残しおよび減容化、安心・安全およびリニューアル対応に関連の強いロボット周辺の飛散アスベスト濃度について着目し、開発に当たっての目標値を以下の通りに設定した。

【研究開発の目標値】

- 単位時間あたりの作業面積が従来の人手による作業の 4 倍以上の作業効率
- 自動、手動による剥離作業後の剥離残しが剥離対象面積の 5% 以内
- 部分チャンバの外の環境が、ファイバ数 0.1 本/cm³ 以下
- 剥離したアスベストの体積を 1/3 以下に減容化

1.2 開発システムの全体構成

鉄骨等に吹付けられたアスベストを除去し、研究開発の目標値を満足するロボット処理システム実現には、現場内の移動機能、作業位置への昇降機能、アスベストの剥離機能、剥離したアスベストの圧縮・梱包機能、粉塵飛散防止機能などの機能が必要である。開発した高性能アスベスト剥離・回収・梱包クローズ型処理ロボットシステムの全体構成を図1.2-1に示す。システムは、遠隔操作可能な自走式昇降台車に7自由度マニピュレータを搭載した剥離ロボットおよび遠隔操作システム、マニピュレータ先端に取り付ける剥離装置、剥離したアスベストを吸引・圧縮して袋詰めする回収・梱包システム等から構成される。

吹付けアスベストの除去工事では作業する部屋全体をポリシートで隔離養生する必要があり、本システムは隔離区域内の剥離ロボットを安全な隔離区域外から遠隔操作してアスベストの剥離から梱包まで一連の作業を自動で行う。剥離したアスベストを剥離装置から吸引ブローで直接吸引してサイクロンで分離し、圧縮装置で圧縮して梱包するまで密閉したシステムで行うため粉塵飛散が少なく安全性が高い。また、粉塵飛散防止のための散水等が従来と比較して少量済み、周辺を汚さないためリニューアル工事にも適している。事務所、店舗、工場などを適用対象として、高さ5mまでの吹付けアスベストの除去を、高速なマニピュレータの自動剥離により人手と同等以下のコスト、工期で行うことができる。

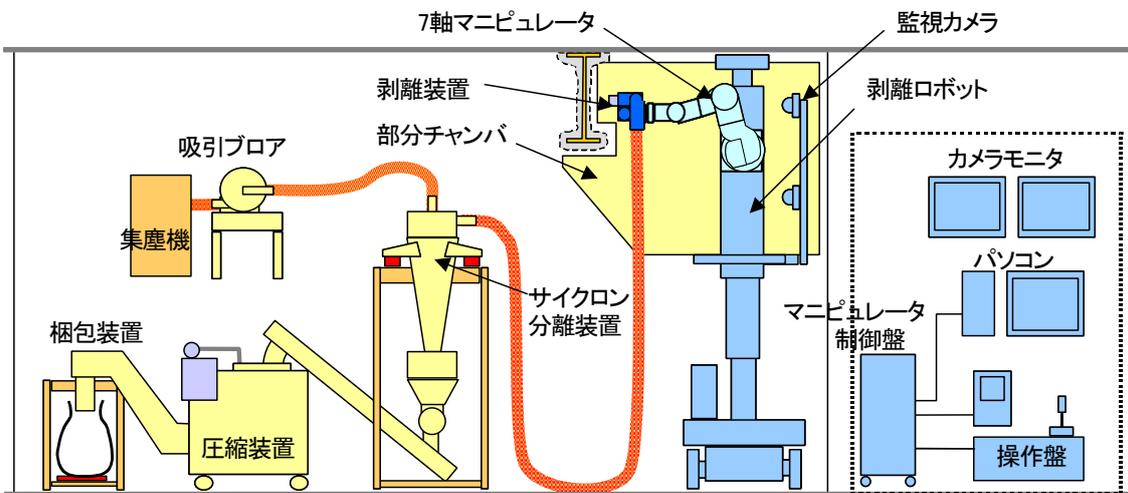


図 1.2-1 開発システムの全体構成

2. 剥離ロボットの開発

2.1 剥離ロボットの概要

剥離ロボットの概要を図 2.1-1、図 2.1-2、仕様を表 2.1-1 に示し、マニピュレータ操作システムを図 2.1-3 に示す。剥離ロボットは、鉄骨梁等の複雑な形状に吹付けられた湿式アスベストの剥離を効率よく行うために、マスト昇降式の自走式高所作業車（SV041、アイチコーポレーション製）に産業用 7 軸マニピュレータ（IA20、安川電機製）を架装し、走行用に 2 台および作業用に 4 台の監視カメラを搭載した。マスト頂部をスラブ下端に押し当てることで剥離ロボットを固定し、マニピュレータは高さ最大 4730mm まで上昇して高さ 5.5m までの作業が可能である。

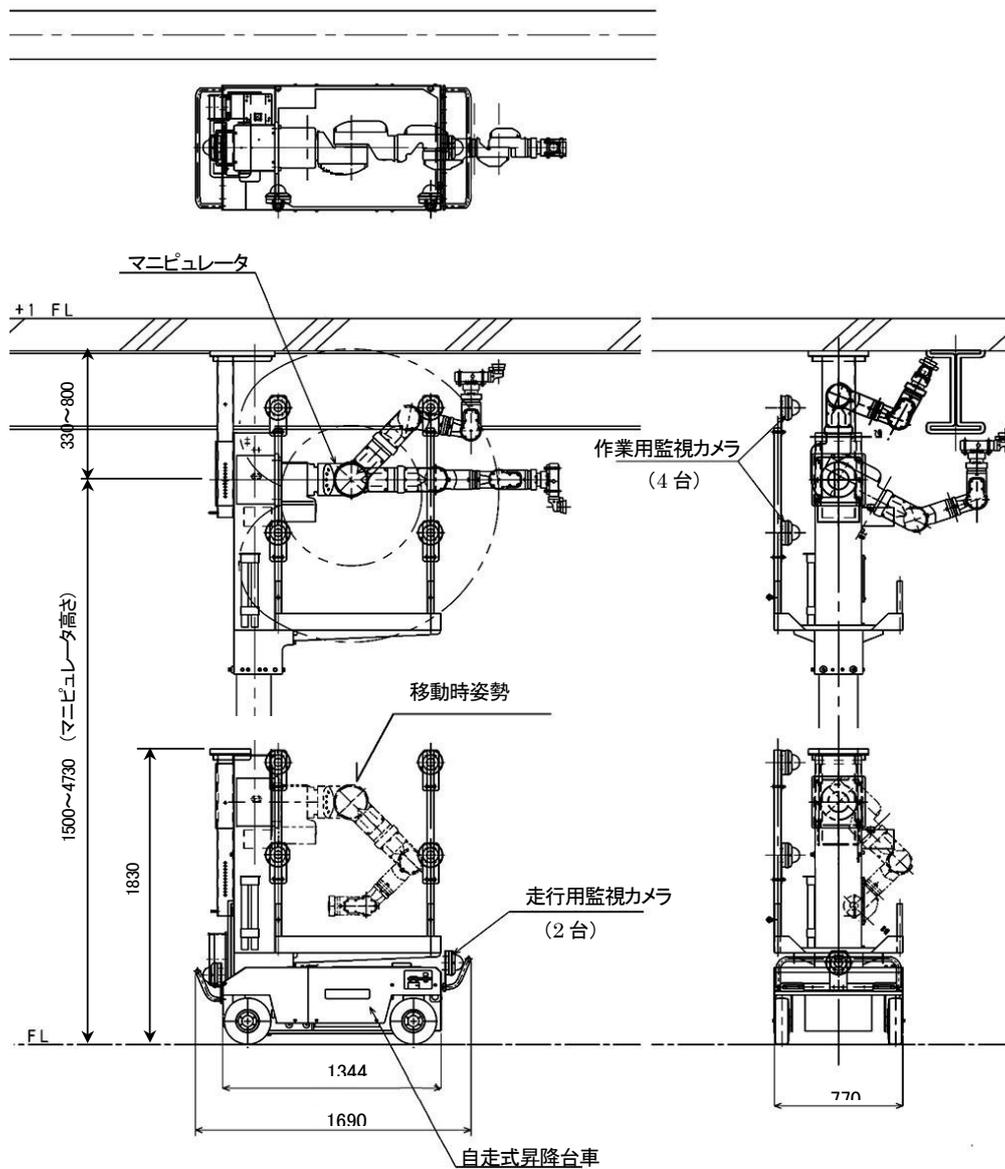


図 2.1-1 アスベスト剥離ロボットの概要

マニピュレータによる剥離作業は図 2.1-3 に示す操作システムによりティーチングプレイバックによる自動剥離と、ジョイスティックを用いた手動遠隔操作を行うことができる。

表 2.1-1 剥離ロボットの主な仕様

●寸法、質量	
外形寸法(走行時)	幅0.77×長さ1.69×高さ1.83(mm)
マニピュレータ高さ	FL+1500~4730
質量	905kg
●能力	
走行速度	高速:0.8km/h 低速:0.6km/h
登坂能力	8°
最小回転半径	1.7m(外側タイヤ中心)
剥離可能高さ	階高最大 5500mm
●マニピュレータ	
構造	7 自由度多関節型
可搬質量	20kg
電源容量	3 相 200V、2.6 kVA
●移動・昇降部動力	
動力源	DC24V バッテリー、100Ah



図 2.1-2 剥離ロボット



図 2.1-3 剥離ロボット操作システム

2.2 マニピュレータ制御システム

2.2.1 マニピュレータの概要

鉄骨梁に吹付けられたアスベストを剥離するためには、ウェブおよびフランジ上下面の全面に対応してマニピュレータ先端の姿勢を変えられる必要がある。本開発の吹付けアスベスト処理ロボットシステムでは、高い自由度と高速な動作が可能な産業用の 7 軸マニピュレータを採用した。表 2.2-1 にマニピュレータの仕様、図 2.2-1 にマニピュレータの形状寸法を示す。

表 2.2-1 7 軸マニピュレータの仕様

名称	MOTOMAN-IA20	
構造	多関節形(7 自由度)	
可搬質量	20 kg	
繰り返し位置決め精度	±0.1 mm	
動作範囲	S 軸	±180°
	L 軸	±125°
	θ 軸	±180°
	U 軸	±125°
	R 軸	±180°
	B 軸	±120°
	T 軸	±360°
最大速度	S 軸	2.62 rad/sec、150°/sec
	L 軸	2.62 rad/sec、150°/sec
	θ 軸	2.97 rad/sec、170°/sec
	U 軸	2.97 rad/sec、170°/sec
	R 軸	5.24 rad/sec、300°/sec
	B 軸	5.24 rad/sec、300°/sec
	T 軸	10.1 rad/sec、580°/sec
本体質量	120 kg	
電源容量	2.6 kVA	

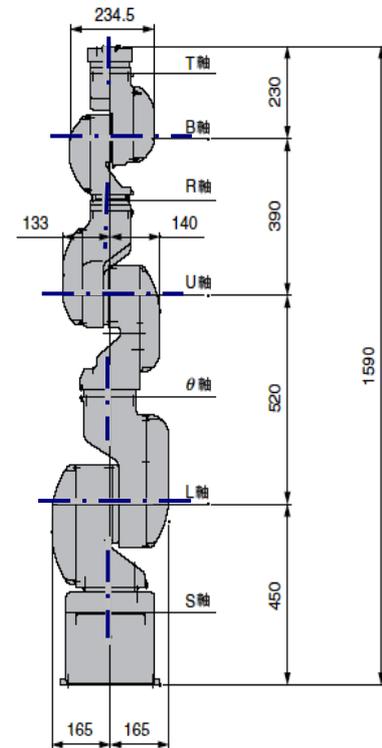


図 2.2-1 マニピュレータ形状寸法

2.2.2 制御システムの構成

本開発システムではあらかじめ作業プログラムをティーチングしておき、作業位置に剥離ロボットを設置してプレイバックすることにより自動で高効率な剥離作業を行う。産業用ロボットは実際の作業に合わせてロボットを動かしながら作業プログラムをティーチングするが、アスベストが吹付けられた鉄骨では鉄骨表面位置のティーチングができないこと、ティーチング作業に時間がかかることなどの問題があり、アスベスト除去現場でティーチングを行うことは困難である。そこで、アスベスト剥離ロボットと鉄骨梁の形状および位置等のデータを入力してパソコン上で作業プログラムのティーチングを行うことができるシミュレーションソフト（MotoSim）を導入することで、オフラインであらかじめ作業プログラムを作成することを可能とした。パソコンとマニピュレータ制御盤を LAN で接続し、作業プログラムをマニピュレータに転送してプレイバックにより自動で剥離作業を実行する。同時にシミュレーションソフトのリアルタイムモニタリング機能により、マニピュレータの動きをリアルタイムにパソコン上に表示して作業状況を監視することができる。図 2.2-2 にマニピュレータ操作システムの概要を示し、図 2.2-3 にオフラインティーチングのパソコン画面例を示す。

現場ではあらかじめティーチングした作業プログラムに従って剥離ロボットを設置し、プレイバックによる剥離作業を行うが、鉄骨には図 2.2-4 に示すようなジョイント部や貫通ダクトなどの障害がありティーチングされた作業プログラムが実行できない場合がある。そこで図 2.2-5 に示すように、パソコン上で必要に応じて剥離作業の開始点および終了点を調整し、障害を避けてから剥離作業を実行する遠隔作業実行ソフトを開発した。図 2.2-6 に遠隔作業実行ソフトの実行画面例を示す。パソコン上で剥離作業の開始点および終了点の調整量を数値入力することで、障害物を避けた部分の剥離作業が実施できる。

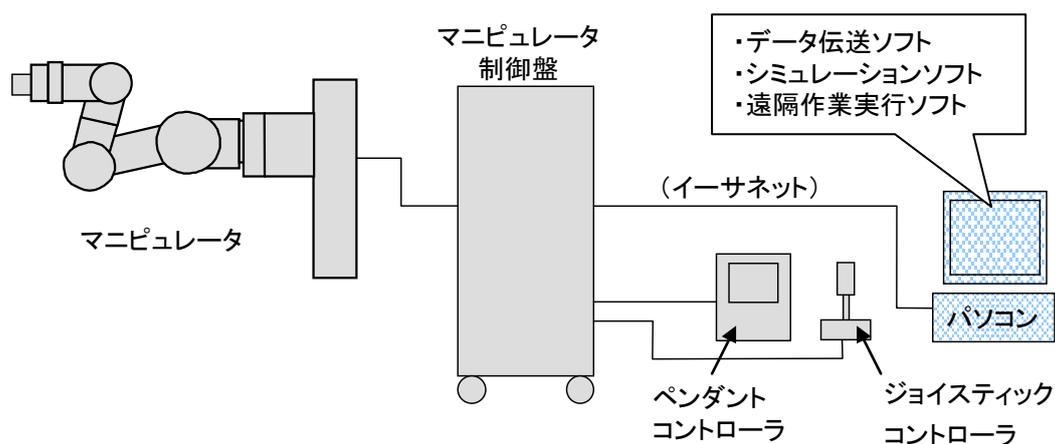


図 2.2-2 マニピュレータ制御システムの構成

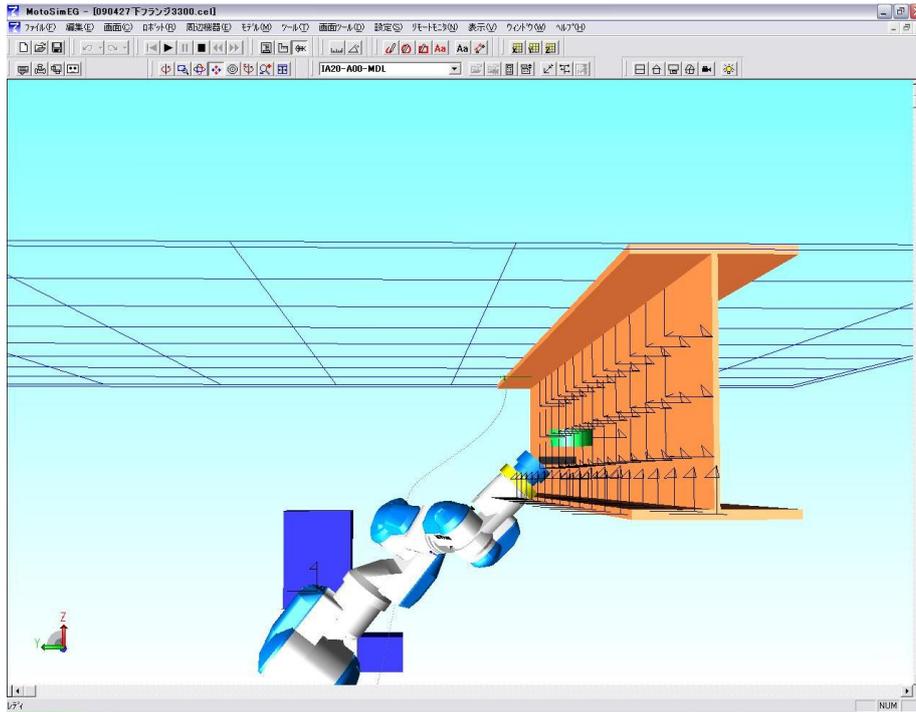


図 2.2-3 オフラインティーチング画面例

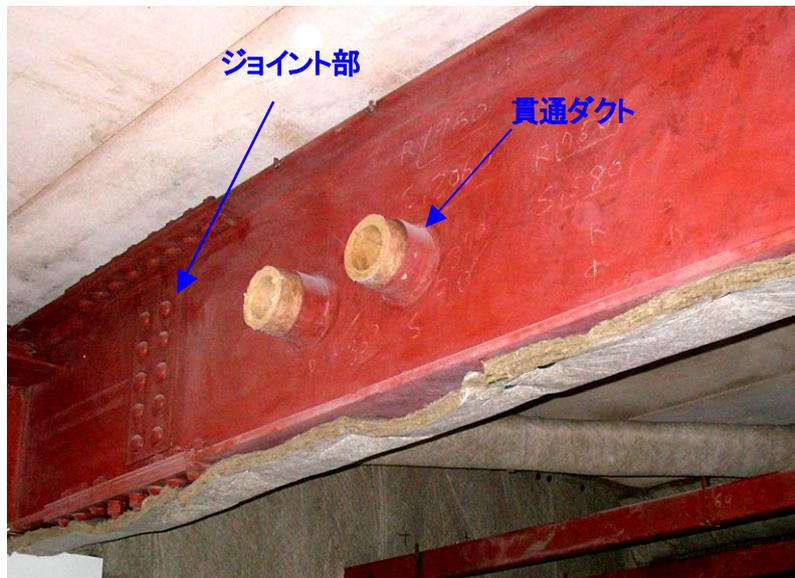


図 2.2-4 鉄骨ジョイント部および貫通ダクト

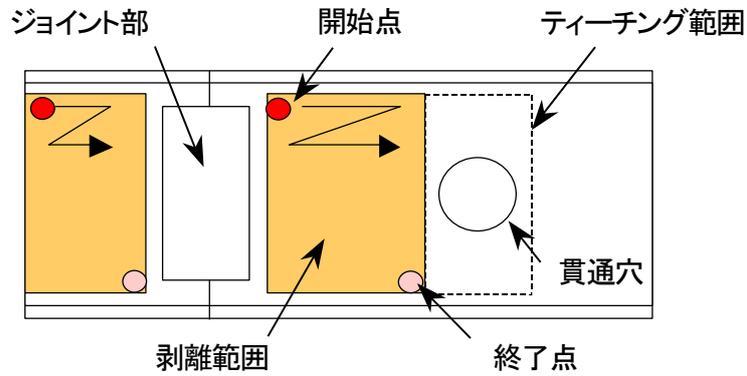


図 2.2-5 障害物回避のための剥離範囲の調整

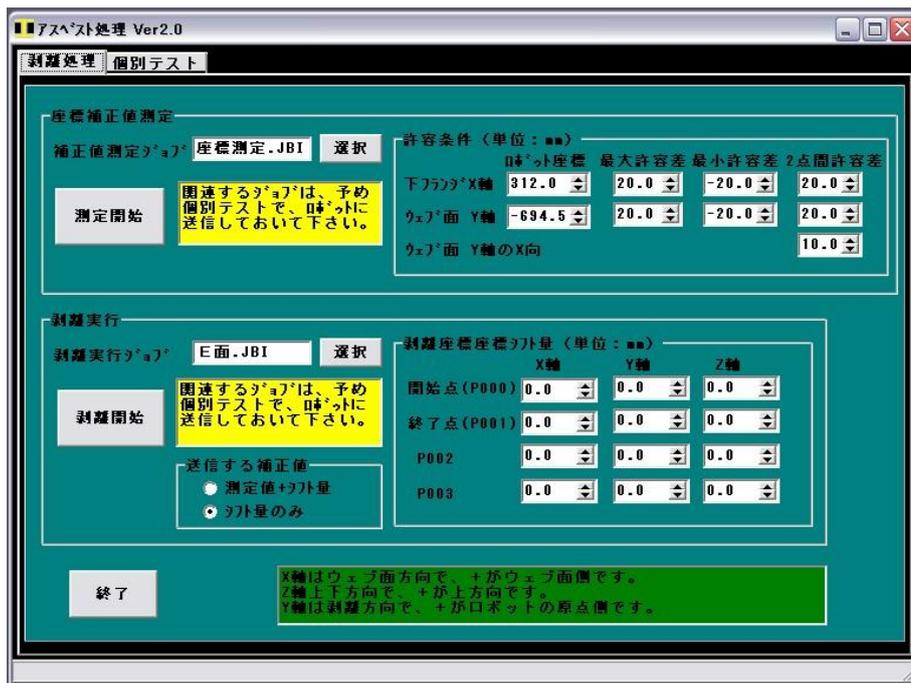


図 2.2-6 遠隔作業実行ソフト画面例

2.2.3 力制御

本開発の剥離ロボットは、移動設置を繰り返しながらマストを伸ばして高所での作業を行うため、マニピュレータを作業場所で高い精度で設置することは難しく、マニピュレータ（ロボット）と鉄骨梁（剥離対象）との位置関係がティーチングで規定したものに対して±10mm程度の誤差が生じる。また、回転型のホイールブラシによる剥離作業は、押し付け力が大きいと回転が停止してしまい、押し付け力が小さいと剥離残しが生じる。よって設置精度の誤差を吸収してスムーズな剥離を行うため、剥離装置に常に最適な押し付け力を加える力制御機能を導入した。力制御による剥離手順を図 2.2-7 に示す。押し付け力の検出は 6 軸力センサで行い、力制御動作範囲内では力制御目標軌道に向かって所定の押し付け力を維持するようにマニピュレータを制御することで、過大な力を生じたり剥離装置が鉄骨表面から離れたりせずに剥離作業が行える。力制御動作範囲および目標軌道はパラメータとして遠隔作業実行ソフトにより設定することができる。また、力制御を正確に行うため、力制御開始直前に力センサの 6 軸力を全て測定して演算を行い、剥離装置や吸引ホースなどのマニピュレータの先端に加わっている重量をキャンセルする機能を有している。

【力制御剥離作業手順】

- ① 力制御 ON、目標軌道に向かって剥離装置を移動開始
- ② アスベスト剥離開始、所定の力が発生するまで移動続行
- ③ 鉄骨表面で所定の力を加えて押し付け
押し付け力が安定するまでタイマーで時間調整
- ④ 所定の力で押し付けながら鉄骨表面に沿って剥離
- ⑤ 剥離終了で力制御 OFF
- ⑥ ジョブプログラムに応じて①から繰り返し

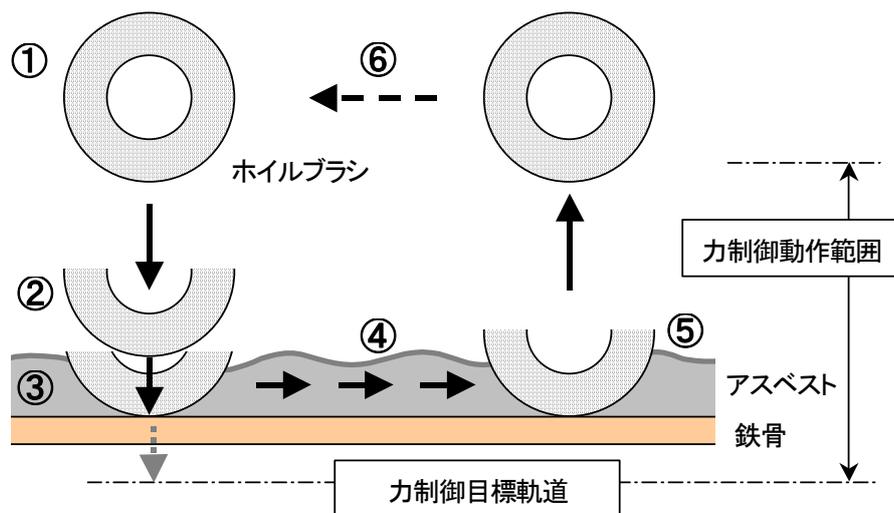


図 2.2-7 力制御による剥離手順

2.2.4 障害物回避機能

剥離装置の押し付け力を制御する力制御により、±20mm 程度の鉄骨面の誤差やなだらかな変位には追従して剥離が可能であるが、鉄骨のジョイント部のボルトや貫通ダクトなど（図 2.2-4）に衝突した場合は、進行方向の力を制御していないため、過大な力が発生してマニピュレータや構造物等の損傷をまねく可能性がある。そのため 2.2.2 項で述べたように、障害物のある場合はあらかじめティーチングしたマニピュレータ作業プログラムの作業範囲の調整が必要であり、手間がかかるとともに剥離残しが生じる。そこで、現場におけるマニピュレータの操作を簡易化し、剥離残しを減らすため、力制御を利用して鉄骨のジョイント部などの障害物を自動的に回避しながら剥離作業を継続して行うことができる障害物回避機能を開発した。

アスベスト剥離作業時に剥離装置の押し付け力とともに剥離進行方向の反力を測定し、障害物に衝突した場合に回避動作を行う。回避動作は、図に示す回避高さ設定値と回避距離をあらかじめ設定しておき、障害物への衝突を検出した時に設定に従って回避動作を行う。剥離作業は回避中も継続するため回避軌道上のアスベストは剥離される。障害物が設定値より大きな場合は、設定した動作を繰り返すことにより回避動作を行う。図 2.2-8 はジョイント部のボルトを想定して回避動作を 3 回繰り返して回避する例を示す。最初の障害物への衝突による力 F_1 を検出して回避高さ設定値 H_a の回避動作を行い、第 2 回目の衝突 F_2 においても同じ回避動作を行うが、第 3 回目の衝突では鉛直方向の力が大きいため設定値 H_b による回避動作を行い回避幅 L_b によりボルトを乗越える。障害物が連続する場合は図のように繰り返して剥離しながら障害物を回避することができる。繰り返し動作回数数の最大値を設定することで、最大値を超える障害物（貫通ダクト等）の場合はその列の剥離動作を終了して次の列の最初から剥離動作を継続する。また、衝突する力の向きにより回避動作量は 2 種類設定することができる。

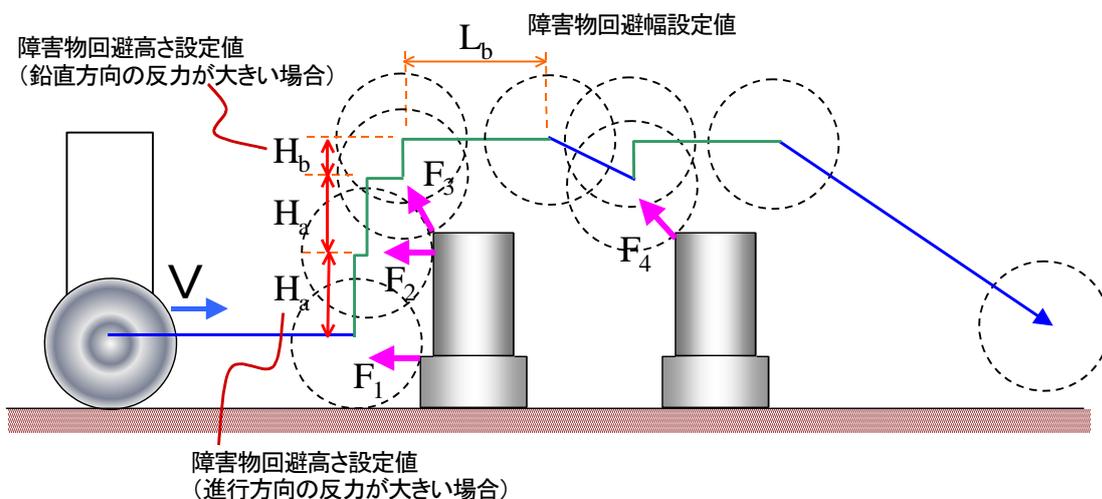


図 2.2-8 障害物回避動作の原理

2.2.5 ジョイスティック操作システム

アスベスト処理ロボットシステムはあらかじめ作成した作業プログラムに基づいた自動剥離を主体とするが、手動による遠隔操作を行うため、図 2.2-9 に示すような操作盤に 6 軸ジョイスティックおよび 1 軸操作のためのトグルスイッチを装備しており、自動剥離で生じた部分的な剥離残しの除去作業などを行うことができる。ジョイスティックは制御盤上の有効スイッチで ON/OFF を行い、マニピュレータの 7 軸のうち 6 軸 (S、L、U、R、B、T) はジョイスティックの軸にそれぞれ割振られているが、 θ 軸は操作盤上のトグルスイッチで操作する (図 2.2-10)。マニピュレータの動作速度はジョイスティック各軸の操作により可変であるが、 θ 軸はトグルスイッチによる ON/OFF 制御である。図 2.2-11 にジョイスティック制御システムの構成を示す。

ジョイスティックの操作モードには、各軸がマニピュレータの各関節軸に対応して個別に動作する各軸モードと、剥離装置の姿勢を保ったまま 3 軸 (X、Y、Z) 方向に動作する直交モードがある。直行モードでは同時に剥離装置のホイールブラシ先端位置を固定して剥離装置を 3 軸 (RX、RY、RZ) まわりに回転させて姿勢を変えることができる。剥離作業は平行移動で行うため直行モードで行うが、直行モードでは直線補間のための演算を行うため動作速度が遅くなること、マニピュレータの動作が不可能となる特異点が生じる場合があるため、必要に応じて各軸モードを使用して手動遠隔操作を行う。モードの設定はペンダントコントローラ上で切り替えることができる。

6 軸が一つに集約されているため操作には慣れが必要である。また、ジョイスティックによる操作では約 0.1 秒程度の時間遅れがあるが、特に問題なくスムーズに操作することが可能である。ジョイスティック制御では力制御を用いることができないため、操作はカメラのモニタ画像を見ながら注意深く行う必要がある。

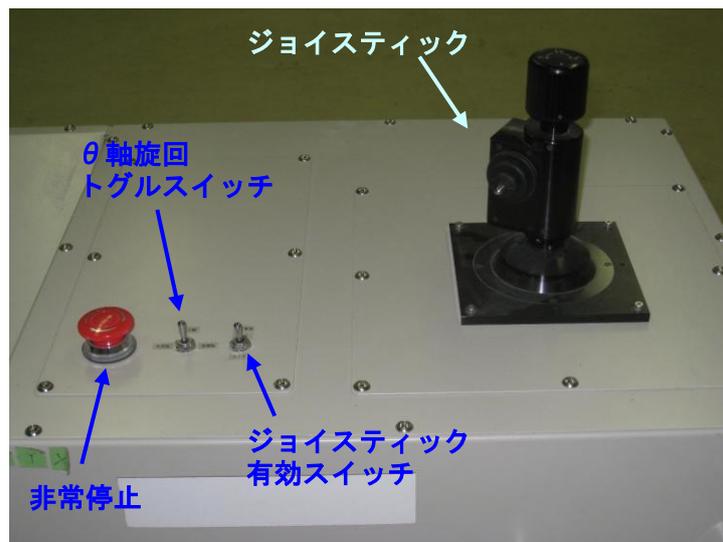


図 2.2-9 マニピュレータ操作盤の概要

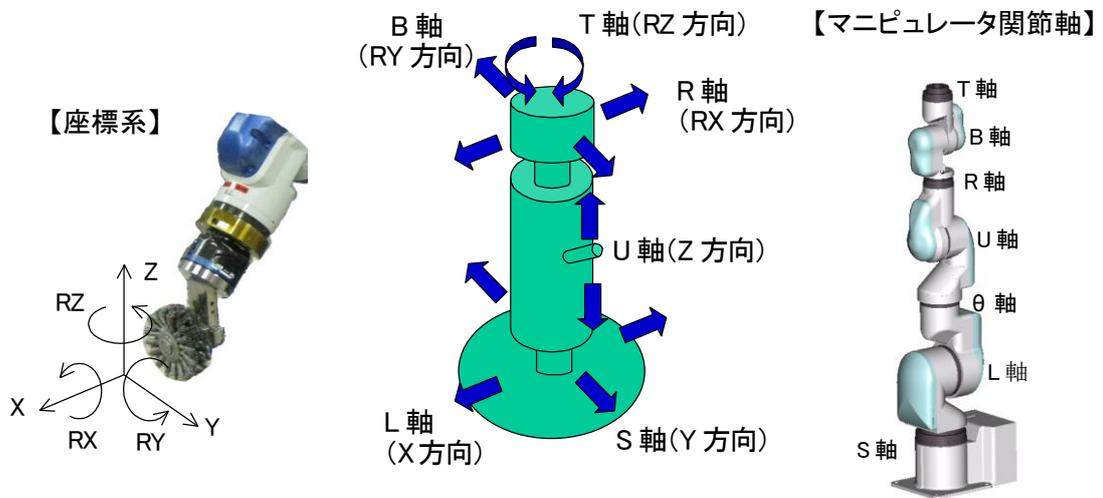


図 2.2-10 ジョイスティックの概要

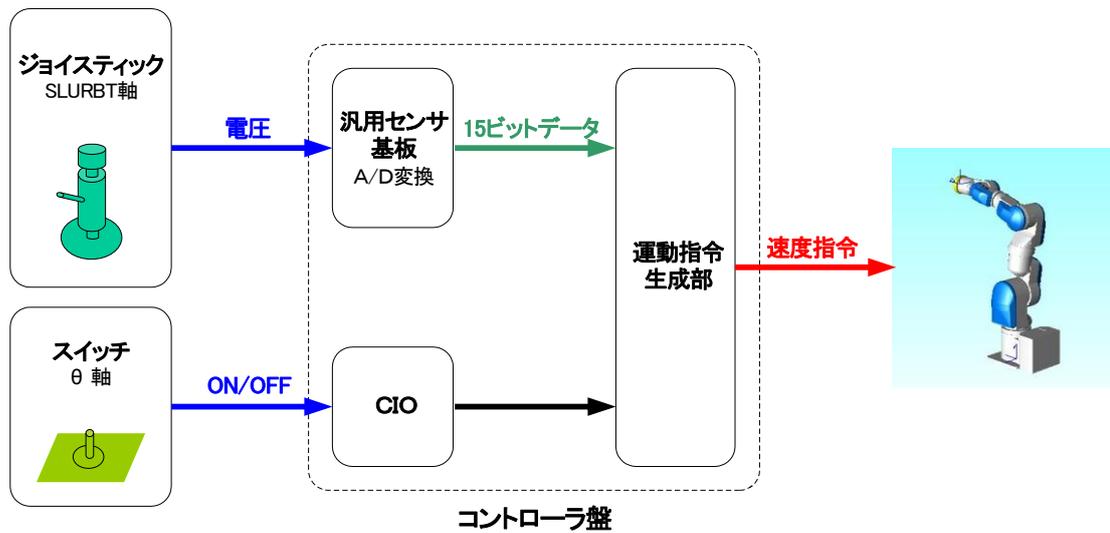


図 2.2-11 ジョイスティック制御システムの構成

2.2.6 作業監視カメラ

剥離作業を監視するため、図 2.2-12 に示すように剥離ロボットに 4 台の監視カメラを搭載した。上部に鉄骨梁のウェブとフランジ内側の監視用、下部に鉄骨梁のフランジ下端の監視用を左右にそれぞれ取り付けることで、剥離作業を常に監視することができる。モニタ画像を図 2.2-13 に示す。モニタ画像は切り替え装置により 4 分割による 4 台の表示と 1 台ごとに全画面表示の選択が可能である。



図 2.2-12 剥離作業監視カメラ取付け状況



図 2.2-13 剥離作業監視用モニタ

2.3 自走式昇降台車

2.3.1 自走式昇降台車の選定

本開発のアスベスト剥離ロボットは、隔離区域の外から遠隔操作で移動しながら高所の鉄骨梁のアスベストを剥離する必要がある。本開発では床上を自走する昇降台車にマニピュレータを搭載して剥離作業を行う構成とし、自走式昇降台車の要求仕様を検討した。

① 作業高さの検討

図 2.3-1 に 1978 年から 1992 年に竣工し、アスベストを使用していると考えられる当社施工の建物 97 棟の階高を調査した結果を示す。ロボットの最高作業高さを 4m とすると基準階は全ての建物に適用可能であるが、階高の高い 1 階を含めると適用可能な建物が 69% となる。作業高さ 5m とした場合は 1 階も含めて 96% の建物に適用可能となる。本開発では最高作業高さの要求仕様を 5m 以上と設定した。

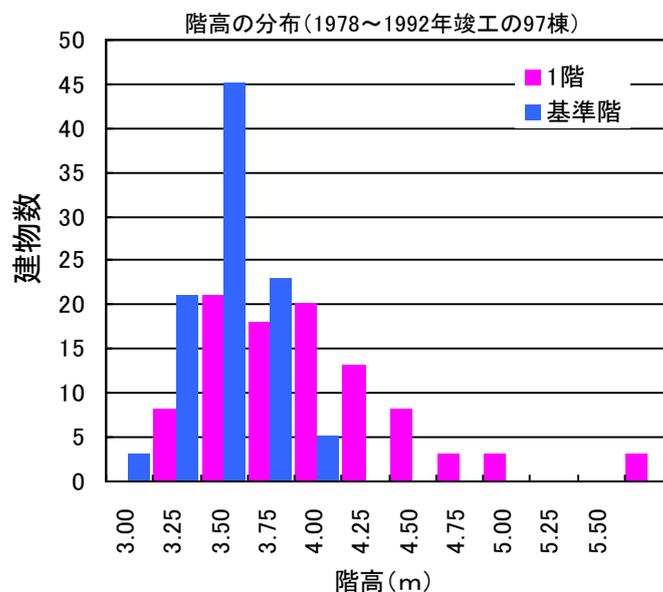
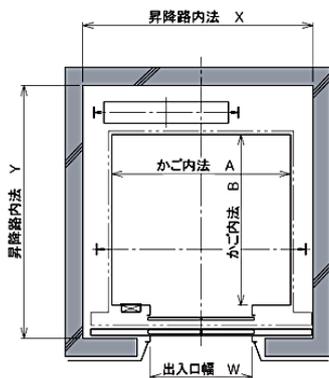


図 2.3-1 建物の階高調査結果 (当社施工建物)

② 寸法・質量の検討

自走式昇降台車は、移動時に一般的なオフィスビル等の出入口を通過可能とし、上下階移動のために本設エレベータに積載可能な寸法・質量とした。エレベータの能力・形状は様々であるが、一般的なオフィスビルのエレベータ寸法を図 2.3-2 のように設定し、この寸法のエレベータに乗降できる寸法 (長さ 1400×幅 800×高さ 1900 以下) とした。質量は、約 200kg のマニピュレータを搭載した状態でエレベータに積載可能な質量 (昇降台車+マニピュレータ+作業員 1 名で 1000kg 以下) とした。



15人乗り
 積載荷重: 1000kg
 内寸: (A) 1600(mm) × (B) 1500(mm)
 入口寸法: 幅(W) 900(mm)、高さ2100(mm)

図 2.3-2 エレベータ能力、寸法

③自走式昇降台車の要求仕様

以上の検討により設定したベースマシンの要求仕様を表 2.3-1 に示す。

表 2.3-1 自走式昇降台車の要求仕様

項目	要求仕様
作業高さ	5m 以上
移動時寸法	長さ 1400×幅 800×高さ 1900 (mm) 以下
質量	700kg 以下

④自走式昇降台車の選定

要求仕様と機械の入手しやすさ等を考慮して、アスベスト剥離ロボットに使用する自走式昇降台車をマスト昇降方式の自走式高所作業車から選定した。高所作業車の走行装置にはホイール式とキャタピラ式の 2 種類があり、ホイール式は直進性が良好で床を傷つけたり汚したりせずに走行可能であるが段差や凹凸のある床面の走行が困難であること、キャタピラ式は段差や凹凸面の走行が可能でその場旋回など機動性が良好であるが床を傷つけたり汚す恐れがあることなどそれぞれに特徴がある。アスベスト除去現場の床には 2 重ポリシートによる養生が義務付けられており、走行時およびステアリング時にポリシートを乱すという懸念がある。そこで、図 2.3-3、図 2.3-4 に示すように 2 重のブルーシートを敷いた床上で走行実験を行った結果、キャタピラではステアリング時にシートを大きく巻き込むが、ホイール式では大きな問題はなかった。それぞれの特徴、実験結果を総合的に評価して、剥離ロボットのベースマシンには車輪式の高所作業車を採用した。



図 2.3-3 シート上走行実験 (キャタピラ式)



図 2.3-4 シート上走行実験 (ホイール式)

2.3.2 作業時の走行台車固定方法

剥離作業時の剥離装置の押し付け反力によるマニピュレータの揺れを防ぐため昇降台車を固定する必要があるため、マスト頂部に固定板を取り付けてマスト上昇時にスラブ下端に押し付けて固定する方法を採用した。図 2.3-5 に固定機構の概要を示す。剥離対象によりマニピュレータの高さを調整する必要があるため、固定板をマニピュレータ取付け高さから 330mm～800mm の間で手動により調整可能とした。また、頂部にネオプレンゴム 20mm+硬質ゴム 10mm を貼り付けて多少の不陸を吸収可能とした。



図 2.3-5 マスト頂部押し当て式固定機構

マニピュレータ等の約 220kg を積載して、押し付け力が 200N 程度得られるように昇降用油圧ポンプのリリーフ圧を調整し、作業時の反力によるマニピュレータの変位量を把握するため加力実験を行った。加力実験は、図 2.3-6 に示すように固定板を天井面に押し付けて剥離ロボットを固定し、マニピュレータアームの固定板から 1000mm の位置に 150N まで加力してその点の変位量を測定した。図 2.3-7 に示す測定結果から、加力したときの変位量は比例関係にあり 100N の力を加えた場合の変位量が 3.4mm 程度であった。本開発ロボットの剥離作業の最大反力は 100N 以下と考えられ、力制御を行っているためこの程度の変位は問題ないと考えられる。

スラブ下端に押し付けて油圧ポンプを停止した場合、油圧のリークにより時間とともに押し付け力が低下することが考えられるため、油圧ポンプを停止した状態で放置したとこ

ろ、2時間程度では押し付け力の低下はほとんど見られなかった。実際のアスベスト除去作業では1ヵ所にとどまって行う剥離作業は10~20分であり、運用上30分以上置いて作業を行う場合には必要に応じて油圧ポンプにより押し付ける動作を行うこととした。

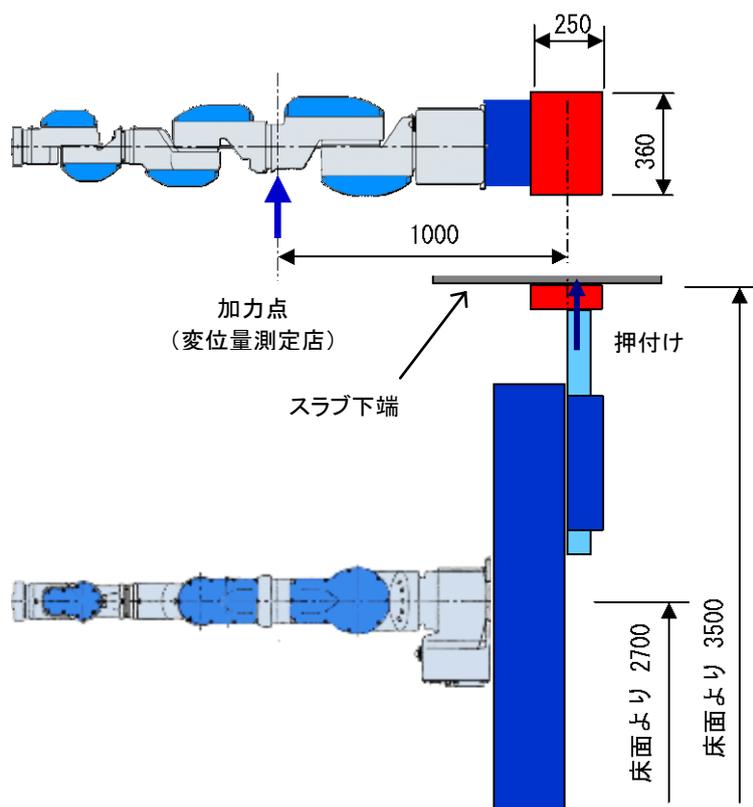


図 2.3-6 剥離ロボット剛性測定方法

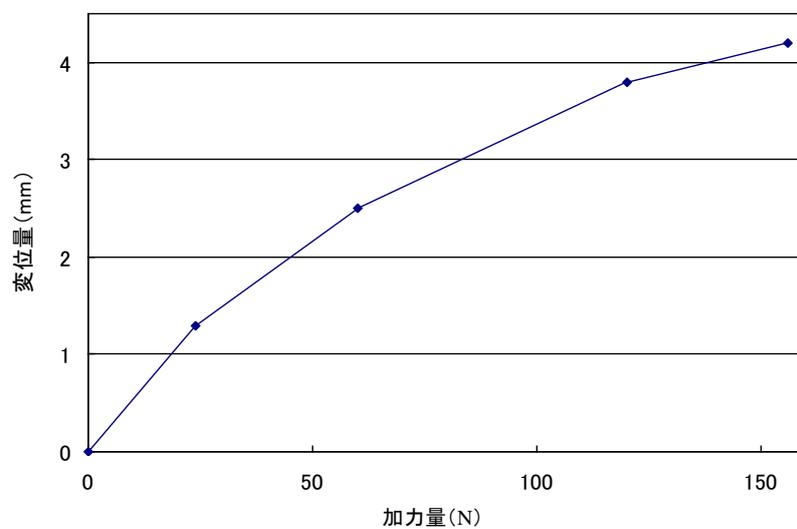


図 2.3-7 剥離ロボット変形測定結果

2.3.3 走行装置

採用した高所作業車の仕様では荷重 75kg の積載で移動することを前提に速度や登坂能力が設定されているが、本開発の剥離ロボットではマニピュレータ搭載により高所作業車の最大積載能力に当たる約 220kg の荷重を常時搭載して走行することになるため、そのままでは登坂能力が不足する。また、遠隔操作で剥離ロボットの位置決めを行う場合、走行速度が速いとステアリング操作が難しく精度の良い位置決めができないため、走行速度を減速して操作性を向上させる必要があった。そこで、当初はチェーンの 1 段減速で減速比 2.15 であった高所作業車の走行装置に 2 段の sprocket を追加して減速比 4.08 に増加させた (図 2.3-8、図 2.3-9)。これにより走行トルクが約 1.9 倍になり、マニピュレータ搭載による剥離ロボット総質量の増加約 1.2 倍に対し十分な能力が得られたと考えられる。走行速度は約 1/2 に減速されているが、さらにステアリング操作性を向上させるため走行用モータの電気回路に抵抗を入れ、スイッチの切り替えにより低速時にはさらに 25% の減速を図った。

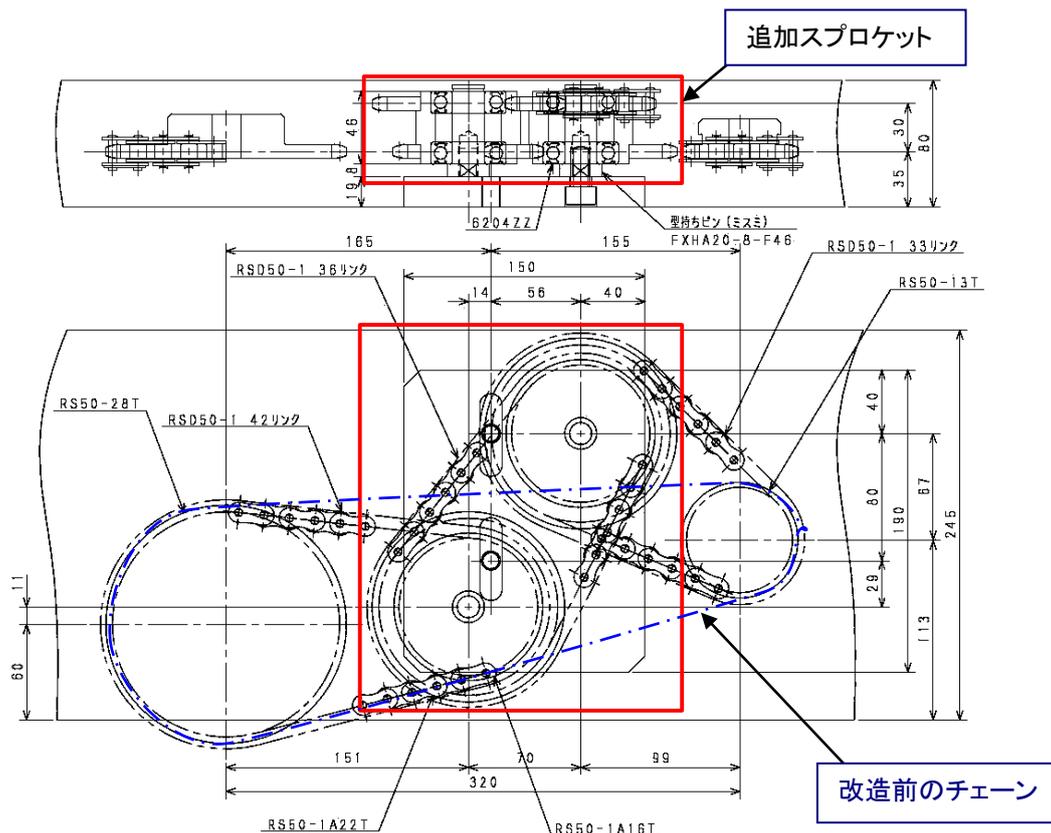


図 2.3-8 走行装置のスプロケット追加

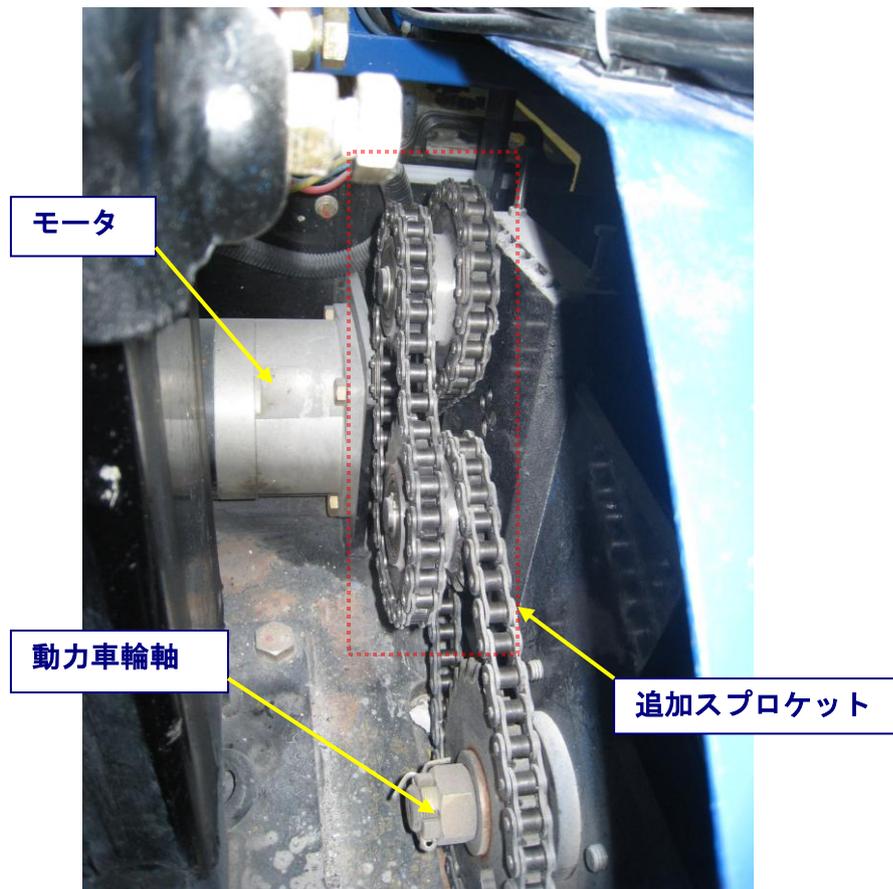


図 2.3-9 スプロケット取付け状況

2.3.4 走行用操作装置および監視カメラ

剥離ロボットの走行操作は図 2.3-10 に示す操作装置により遠隔操作を行う。剥離ロボットは鉄骨に沿って移動しながら剥離作業を実行するため、あらかじめ鉄骨に沿ってラインを引いておき、図 2.3-11 に示すように昇降台車の前後に取り付けた走行用監視カメラ（作業監視用と同じ型式）のモニタ画面（図 2.3-12、図 2.3-13）を見ながら、照準板を床のラインに合わせるように操作する。モニタ画面は分割画面と全画面を選択することができ、操作には慣れが必要であるが、前後左右とも±10mm 程度の位置決め精度を得ることが可能である。

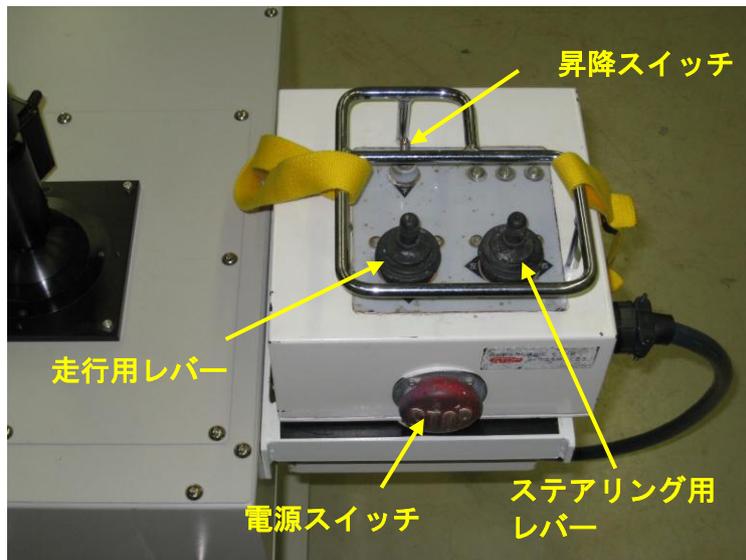


図 2.3-10 走行走査装置



図 2.3-11 走行用監視カメラ取付け状況

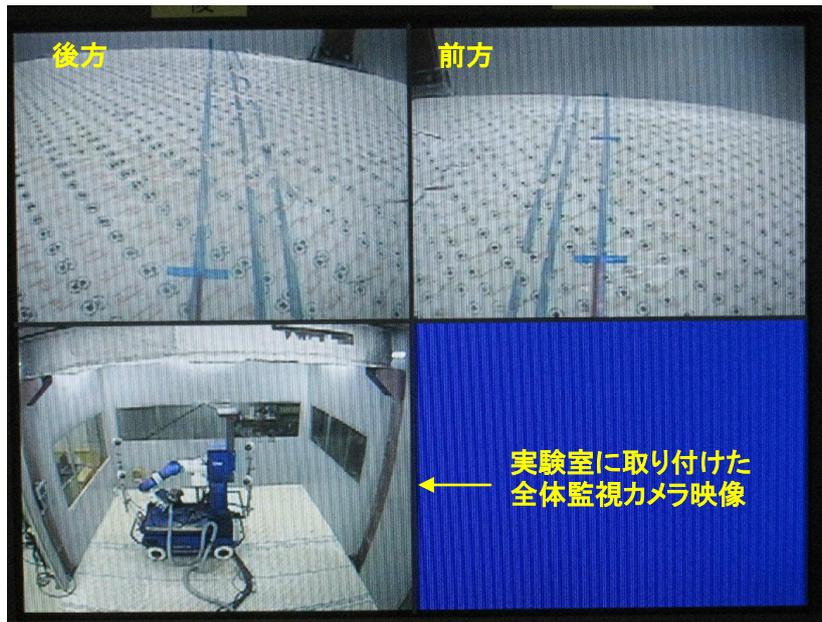


図 2.3-12 走行用モニタ画面（分割画面）

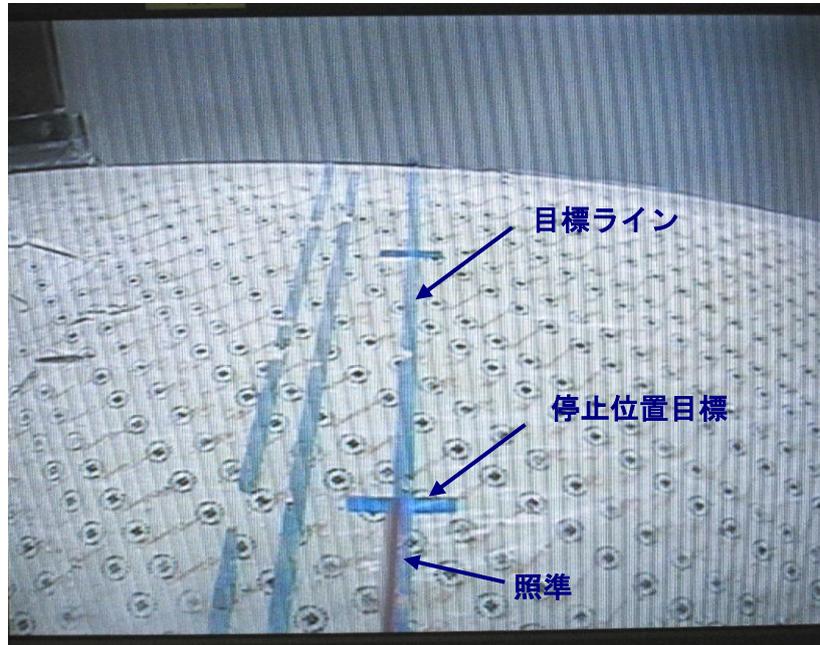


図 2.3-13 走行用モニタ画面（全画面）

3. 剥離装置の開発

3.1 湿式アスベストの物性

湿式吹付けアスベストの物性を推測するため、代替として湿式および半乾式ロックウールで吹付けた試験体を作成して強度試験を行った。その結果を表 3.1-1 に示す。曲げ、圧縮強度ともに半乾式の約 7 倍、かさ比重が約 2 倍あり、固く、緻密に吹付けられている。

表 3.1-1 耐火被覆の強度試験結果

	曲げ強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	かさ比重
湿式 (ウエットN)	0.39	0.54	約0.55
半乾式 (モエンダンネツ)	0.06	0.08	約0.28
湿式/半湿式	6.5倍	6.8倍	約2倍

3.2 回転研削型剥離装置の開発

3.2.1 剥離装置の性能比較

湿式吹付けアスベストは非常に固く（表 3.1-1）吹付けられているため、乾式、半乾式を対象とした平成 18 年度の開発で用いた剥離装置をそのまま使用することが難しいと考えられた。そこで、表 3.2-1 に示す 8 種類の剥離工具を用いて、湿式ロックウールを 25mm 厚で吹付けた鉄骨試験体を手作業で剥離する実験を行い、剥離効率（D）、剥離残し（Q）、粉塵発生量（E）の 3 項目で性能を比較した。剥離実験状況の例を図 3.2-1～図 3.2-3 に示す。

工具①のジェットタガネは手作業では仕上げまで行えるが、厚さのある部分では掻き落とすために時間がかかり剥離効率が低かった。工具②は木工用ルータービットをドリルに取り付けたもので、回転数約 2500rpm で切削することができるものの、刃が鉄骨表面に軽く接触しただけで食い込みが生じ、刃先および鉄骨が傷つくという問題が生じた（図 3.2-1）。工具③の横回転のカップブラシは回転数 5000rpm 以上で効率よく剥離可能であったが、粉塵が非常に多く発生したため実験を中断した（図 3.2-2）。カップブラシは回転数を下げると効果を発揮せず剥離効率が大幅に低下する。工具④の縦回転のホイールブラシでは回転数 3000rpm で粗剥離から仕上げまで比較的効率よく剥離可能であることが分かったが、粉塵発生は多かった。工具⑤、工具⑥は集塵式の塗膜剥離機で、両方とも固いものを削るのには適しているが厚さがある吹付けロックウールの剥離は効率が悪く、集塵カバーが干渉するため剥離残しが多かった。工具⑤は集塵機に接続するもので粉塵発生は少なかったが、工具⑥は本体に吸引羽根を備えたものであまり効果がなく粉塵発生が多かった。工具⑦、工具⑧は高周波振動スクレーパであり剥離能力、剥離残し、粉塵発生とも比較的良好であったが、掻き落とすために工具を起こす操作が必要であり、人間の判断を要するためロボット化は難しいと考えられる（図 3.2-3）。

剥離実験の結果、工具③、工具④の回転ブラシ型は一つの剥離装置で粗剥離から仕上げまで行え、剥離効率が高く、剥離残しが少ないことが分かった。粉塵発生が多いため粉塵

防止対策が必要であるが、ロボット化にも適していると考えられることから回転ブラシ型を採用することとした。

表 3.2-1 剥離用工具による比較実験結果

項目	工具①	工具②	工具③	工具④
本体	電動ジェットタガネ 	電動ドリル 	電動ディスクグラインダ 	電動ディスクグラインダ 
質量	4.5kg	1.9kg	1.6kg	1.6kg
性能	無負荷打撃数 3,000rpm	回転数 0 ~ 3,000rpm	回転数 2,800 ~ 11,000rpm	回転数 2,800 ~ 11,000rpm
先端ツール	ニードル 	ルータービット 	カップナイロンブラシ (回転数9000rpm) 	ホイールブラシ (ひねり鋼線) (回転数4500rpm) 
D: 剥離効率	0.41m ² /h	0.71m ² /h	実験中断のため評価不能	1.65m ² /h
Q: 剥離残し	非常に少ない 	少ない 	実験中断のため評価不能 	少ない 
E: 粉塵発生量	非常に少ない	少ない	非常に多いため実験中断	多い
項目	工具⑤	工具⑥	工具⑦	工具⑧
本体	集塵式電動塗膜剥離機 	集塵式サンダー 	超音波塗膜剥離機 	振動剥離機 
質量	3.7kg	1.6kg	0.77kg	2.2kg
性能	回転数 1,800 ~ 5,000rpm	回転数 12,000rpm	振動数21,000Hz	振動数 12,000Hz
先端ツール	遊星回転型カッターホイール 	研磨カップホイール 	スクレーパ 	スクレーパ 
D: 剥離効率	剥離残し多く評価不能	剥離残し多く評価不能	1.29m ² /h	1.59m ² /h
Q: 剥離残し	多い 	非常に多い	非常に少ない 	非常に少ない 
E: 粉塵発生量	非常に少ない	多い	少ない	多い



図 3.2-1 工具②ルータービット



図 3.2-2 工具③カップブラシ



図 3.2-3 工具⑧振動剥離機

3.2.2 集塵カバー

回転ブラシ型は高速回転するため剥離粉碎された粉塵が多量に発生し、回転による遠心力で勢いよく周辺に飛散することになるため、ブラシの周囲を集塵カバーで覆って直接バキュームで吸引する。回転ブラシには横回転のカップブラシと縦回転のホイールブラシがあり、横回転のカップブラシの場合は 5000rpm、ホイール型の場合 3000rpm 程度の回転数で剥離残しのない仕上げ状態まで剥離が可能であった。カップブラシは接触面積が大きく、全方向に剥離が可能であるためマニピュレータのジョブが簡易になり効率も良いというメリットがあるが、この場合粉塵の飛散方向も定まらないという問題がある。ホイールブラシは接触面積が小さく剥離方向が決まってしまうが粉塵の飛散は一方向のみである。

カップブラシについて図 3.2-4 に示すように、周囲のゴム製のスカートが 10mm 程度の凹凸になじむように構成した集塵カバーを試作して性能確認実験を行った。その結果周囲を凹凸のある吹付け材表面に密着させることが困難であり、高回転数で飛散の勢いが強いいため多量の粉塵飛散を防止することができなかった。また、ホイールブラシについては図 3.2-5 に示すようにホイールブラシをカバーで覆い、開口部周囲にシールブラシを取り付けた集塵カバーを試作して性能確認を行った。その結果、集塵カバーの周囲が吹付け材に限り密着するように設置して吸引した場合は粉塵の漏洩はほとんどなく剥離が可能であるが、集塵カバー周囲の隙間が大きくなると吸引性能が低下して粉塵が飛散することが分かった。図 3.2-6 に性能確認実験に使用した集塵機を示す。

縦回転のホイールブラシの場合は回転数が比較的 low、粉塵飛散が剥離方向に対して前方のみであるため粉塵飛散防止のシール等の対策が比較的容易であると考えられるため、縦回転のホイールブラシ（径 125mm、幅 50mm）を採用することとした。

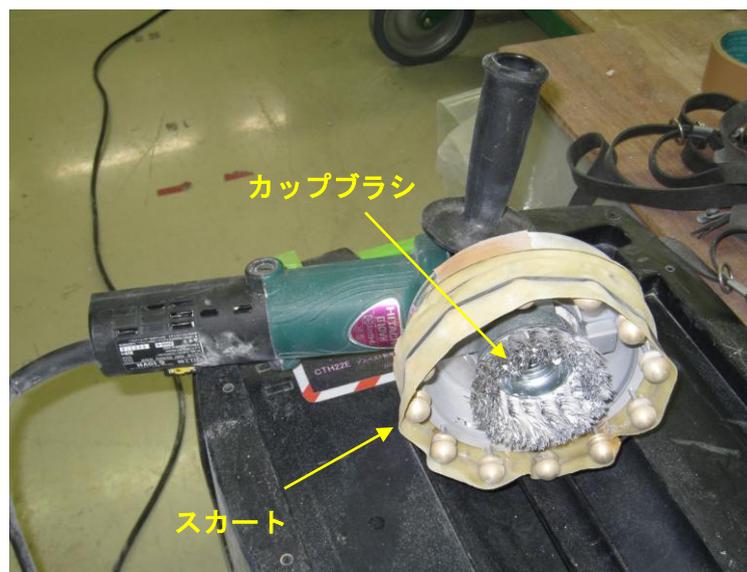


図 3.2-4 集塵カバー付きカップブラシ



図 3.2-5 集塵カバー付きホイルブラシ



図 3.2-6 集塵機の概要

アスベストの剥離厚さを確保するためには集塵カバーからのホイールブラシの突出量を大きく取る必要があるが、集塵カバー周囲の間隙が大きくなり集塵能力が低下する。ホイールブラシで飛散する粉塵は前方に集中して噴出するため、図 3.2-7 に示すようにホイールブラシの前方にシールブラシと吸込み口を設け、粉塵をシールブラシで止めて吸込み口から吸引することで粉塵飛散防止を図った。吸込み口は集塵カバー内部にも設け、空気の流路を作ることによって吸込み口の空気の流速を確保し（吸込み口面積の合計で流速が決まる）、集塵カバーの周囲の間隙にかかわらず集塵能力が確保される。

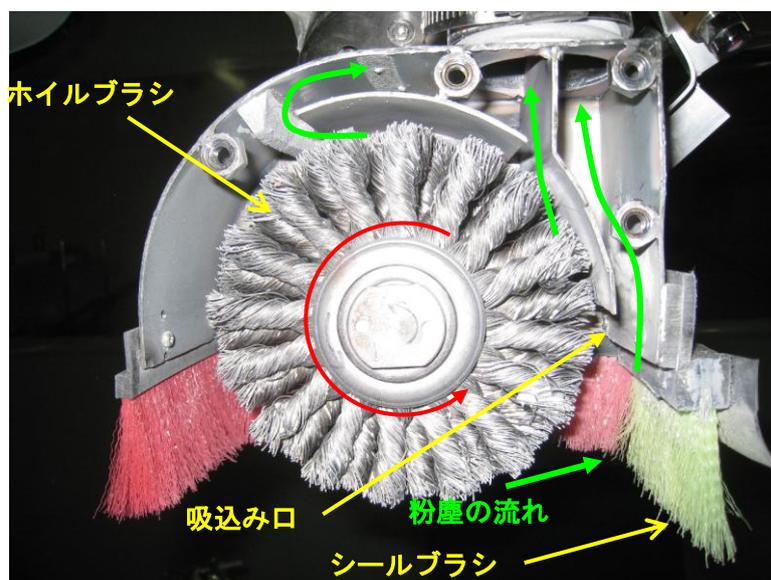
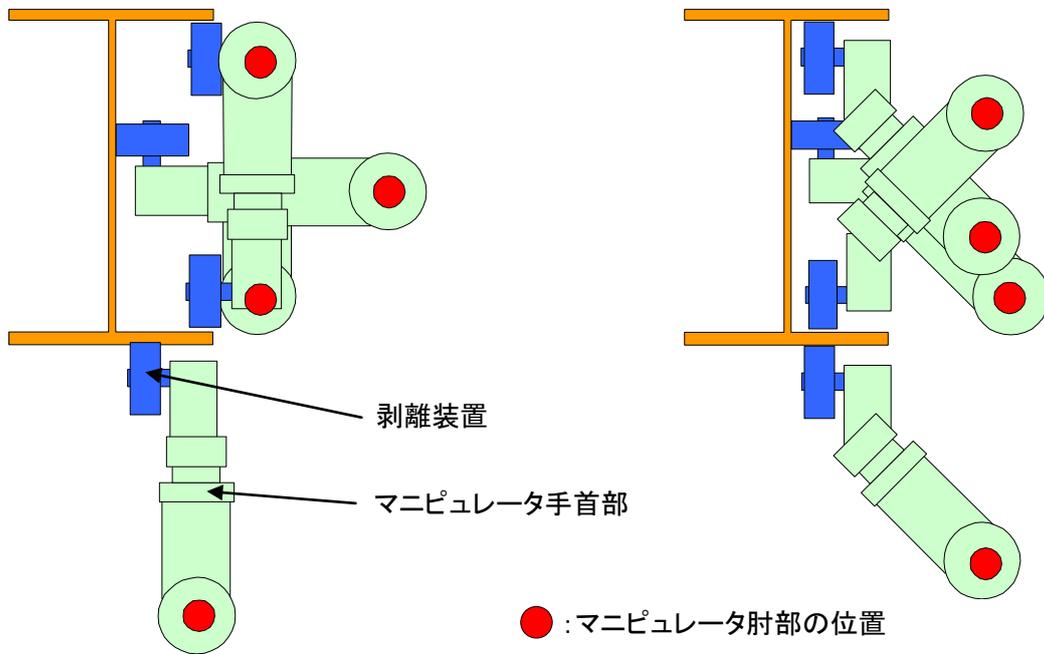


図 3.2-7 粉塵飛散防止型集塵カバー

3.2.3 剥離装置取付け角度

鉄骨梁の剥離では上下フランジとウェブ面の 3 方向に対して剥離装置を正対させて作業を行う必要がある。図 3.2-8 に剥離装置の取付け角度とマニピュレータ手首部の姿勢を示す。図 3.2-8(a) に示すように、マニピュレータの手首部に対して直行方向に剥離装置を取り付けると、3 方向に正対させるためには手首の姿勢をそれぞれ 3 方向に向ける必要があり、マニピュレータ肘部の関節の作業範囲が広く要求される。また鉄骨フランジと手首の干渉などが生じて剥離作業ができない場合がある。そこで、図 3.2-8(b) に示すように剥離装置を手首に対して 45° に取り付けることにより、手先の回旋により直交方向の作業が可能となり、手首部の 2 方向の姿勢で 3 方向に剥離装置を正対させることができ、鉄骨との干渉も避けることができる。



(a) 直交方向への取付けの場合

(b) 45° 方向への取付けの場合

図 3.2-8 剥離装置取付け角度

3.2.4 剥離工具駆動装置

鉄骨細部の剥離作業の作業性を考慮するとマニピュレータ先端の剥離装置の寸法・質量はでき限り小さい方がよく、固く吹付けられた湿式アスベストの剥離のためにはパワーの大きな動力が望ましい。そこで、図 3.2-9、図 3.2-10 に示すように剥離装置から駆動用モータを離し、フレキシブルシャフトを用いて回転を伝達する駆動装置を開発した。フレキシブルシャフトは鉄骨フランジとの干渉を避けるため、ホイールブラシの回転軸からベベルギアを介して直角方向に取り付けた。駆動用モータは、当初はインバータ制御の 0.4kw・3 相モータを使用していたが、力制御の確認実験で出力が小さいことが判明したため 0.75kw に大型化した。

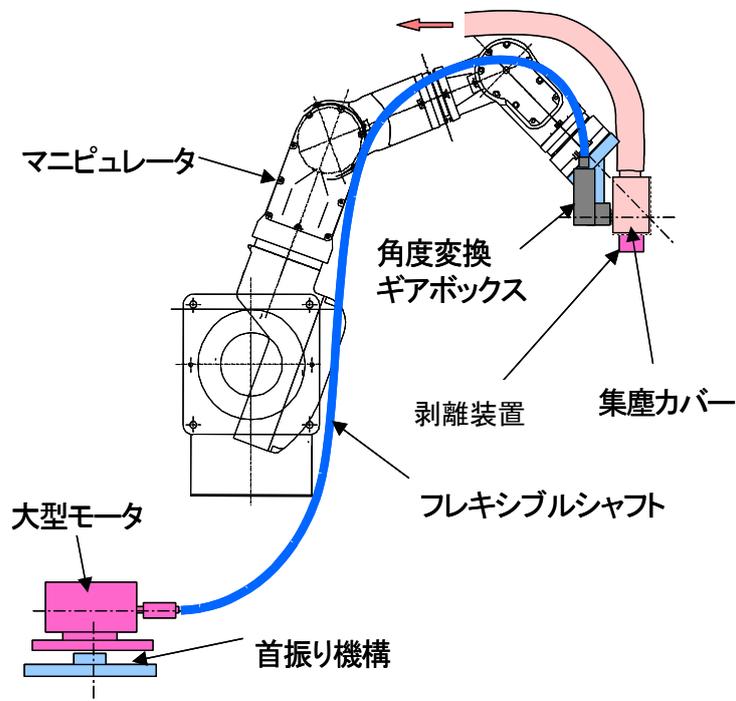


図 3.2-9 剥離工具駆動装置の構成

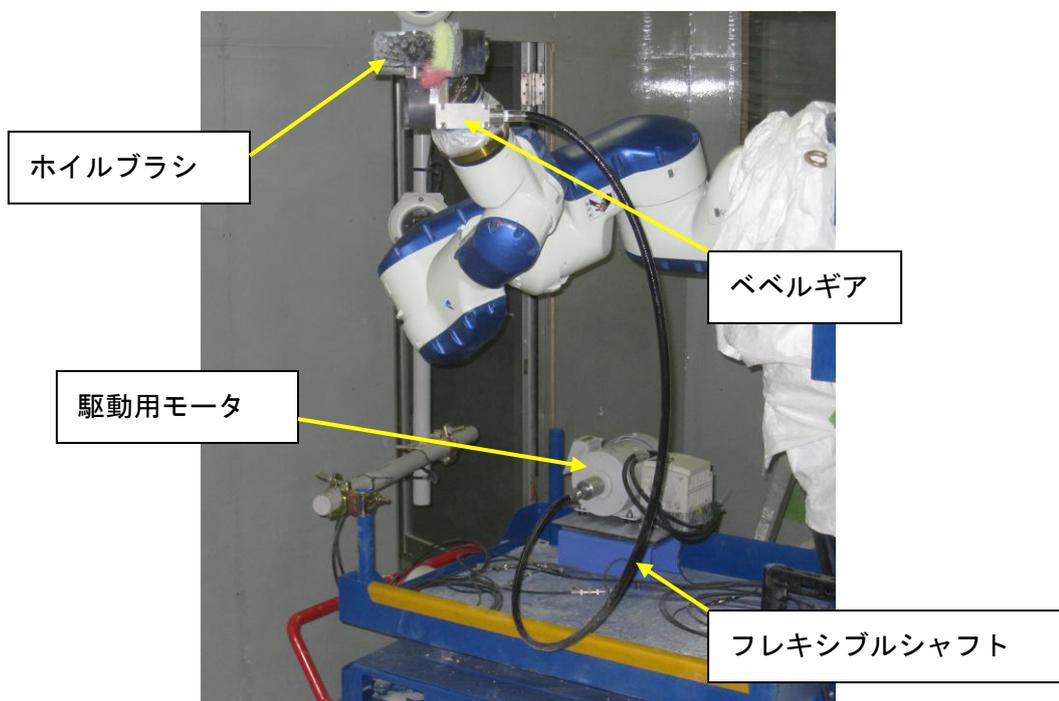


図 3.2-10 剥離装置駆動装置

3.3 剥離装置の性能確認

剥離装置を試作して剥離性能および集塵性能を確認するため、厚さ 25mm の湿式ロックウールを吹付けた試験体で剥離動作確認実験を行った。図 3.3-1 にその状況を示す。剥離装置は径 125mm×幅 50mm のホイールブラシ（図 3.3-2）を用いて 3000rpm で剥離し、集塵カバーから粉塵を集塵機で吸引した。性能確認実験の結果、力制御を使用したマニピュレータのティーチングプレイバックによる自動剥離により問題なくスムーズに剥離作業が行え、剥離速度 23mm/sec が得られた。また、厚さ 25mm の湿式吹付けロックウールをほぼ 1 回で鉄骨表面まで剥離可能であり、粉塵発生はほとんど見られなかった。



図 3.3-1 剥離装置の動作確認状況



図 3.3-2 ホイールブラシ型剥離装置

4. 回収・梱包システムの開発

4.1 回収・梱包システムの概要

粉体状に剥離したアスベストを回収して圧縮・梱包するシステムの構成を図4.1-1に示す。本システムでは、剥離したアスベストを剥離装置から吸引ブロアで直接吸引し、サイクロンで空気と分離してロータリバルブで圧縮装置に供給し、袋詰めする。袋詰めしたアスベストの質量を荷重計で測定して、設定値（10kg～15kg）に達した時にランプと警報を発して袋の交換時期を知らせるとともにロータリバルブを停止する。また、サイクロンとホップの質量を測定し、ホップが満杯となった場合に警報を出すとともに吸引ブロアを停止する。一連の作業は密閉された環境で行うことができ粉塵の飛散はないが、アスベストの袋を外して新しい袋と交換する必要があるため、システム全体を隔離エリア内に設置するものとする。本システムは、アスベストの剥離作業と平行して自動で袋詰めまで行うため、従来作業で必要であった掻き落したアスベストを回収・梱包して清掃する作業が軽減される。

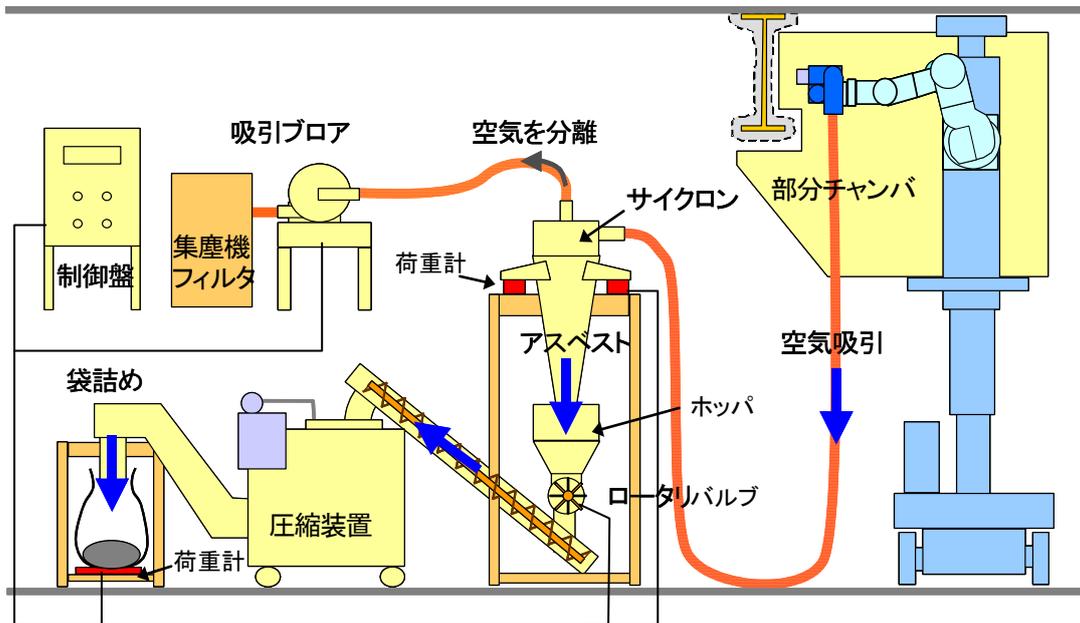


図 4.1-1 回収・梱包システムの構成

4.2 部分チャンバ

本開発システムの構成では、マニピュレータ全体を囲う部分チャンバを設置して粉塵飛散防止を図っている。図 4.2-1 に、フレームにポリシートを張り、剥離ロボット昇降時に鉄骨と干渉しないようにスライド機構を設けた部分チャンバ構成例を示す。平成 18 年度の開発で、部分チャンバ内が負圧となるように空気を吸引し、開口部や隙間部から流入する空気の流速が 0.55m/sec 以上に保てば部分チャンバから粉塵が飛散することを防ぐことができることが分かっている。部分チャンバの隙間の周長を 7m と仮定し、隙間を 20mm 以内に収めれば隙間の総面積が 0.085m² となり、空気の流速を 0.55m/sec 以上確保するためには、風量 5m³/min 程度のブローで吸引すればアスベストの部分チャンバ外部への飛散を防止することが可能と考えられる。

アスベスト除去現場では石綿障害予防規則により、作業場所をビニールシートで覆う隔離措置と集塵機により内部を負圧に保つことが規定されている。隔離養生内部のファイバ本数などの規制値は現状では特にないが、使用が義務つけられている全面形取替え式防塵マスクの推奨濃度はファイバ本数 7.5 本/cm³ 以下である（平成 21 年 4 月より電動ファン付に改定、推奨濃度 15 本/cm³ 以下）。部分チャンバを設ければ隔離措置が不要となる程度の非常に高い環境（0.01 本/cm³）を得ることが可能と考えられるが、実際の作業では規定により隔離措置を省略することはできない。

本開発における環境目標値はアスベストファイバ数 0.1 本/cm³ であり、本開発システムでは剥離装置から直接吸引するため部分チャンバを使用しなくても目標値は達成可能と考えられる。部分チャンバを設けることは、剥離ロボットの移動盛替え時に手間がかかり、マニピュレータ部質量の増大などの問題があることから、本システムでは部分チャンバは現場や周辺環境などの状況により選択するオプションと考えることとした。

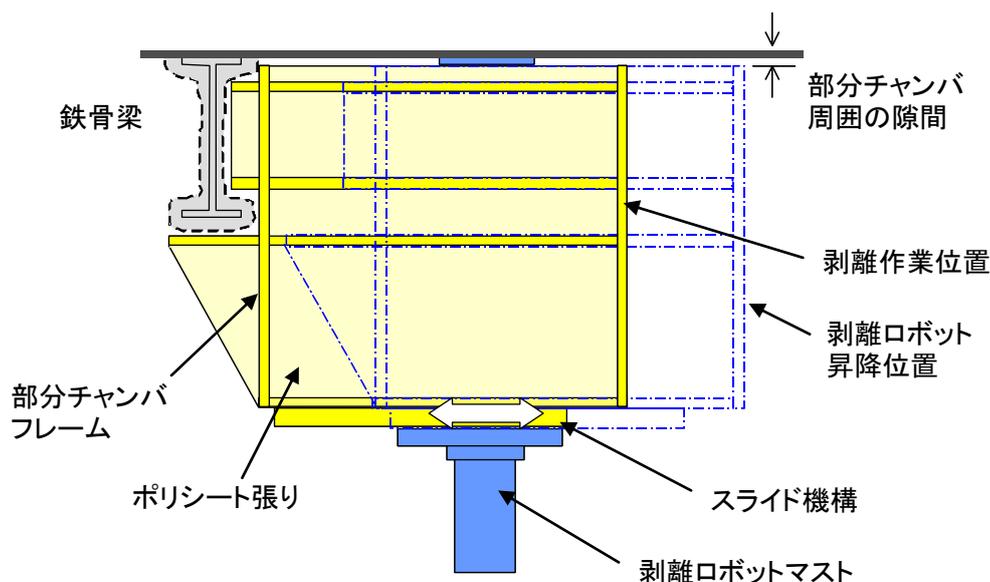


図 4.2-1 部分チャンバ構成例

4.3 分離装置

粉体状に剥離されたアスベストは剥離装置の集塵カバーからブロアにより吸引し、分離装置で空気と分離して梱包装置で袋詰めされる。剥離装置より圧送された剥離物を空気から分離するための分離装置として、気流分離方式とサイクロン分離方式について実験装置を試作してその性能を検討した。

4.3.1 気流分離方式

図 4.3-1 に気流分離方式の概要を示す。気流分離方式は、吸引ブロアで圧送された剥離アスベスト混入の空気を分離筒の下部に吹き込み、風量がバランスするように分離筒の上部から集塵機で吸引することで筒内の上昇気流の中で比重の重い粒子が沈降する。気流分離方式は気流のバランスが取れているため、落下した粒子のみが分離筒下部の開口に設置した圧縮装置の定量供給部に連続的に排出される。微細な粉体は沈降し難いため、筒内部に水を噴霧することで凝集して分離可能とした。図 4.3-2 に示す気流分離装置を試作して、湿式吹付けロックウールを粉砕して粉体状にした試験体を用いて分離実験を行った。実験では、粉体の試験体は定量供給部から供給して分離筒で分離し、圧縮装置に排出した。

試作した気流分離装置による性能確認実験の結果、噴霧する水の添加量が適切であれば粉体のほとんどが分離して落下し、上部から集塵機に吸引された空気に湿った粉体が混入することはほとんどなかった(図 4.3-3)。圧縮装置に供給される剥離アスベストと加水量が適切な場合は圧縮装置による圧縮固化が可能であるが、加水量のバランスが悪いと正常な圧縮固化が困難となることが分かった。圧縮装置性能については次節で述べる。

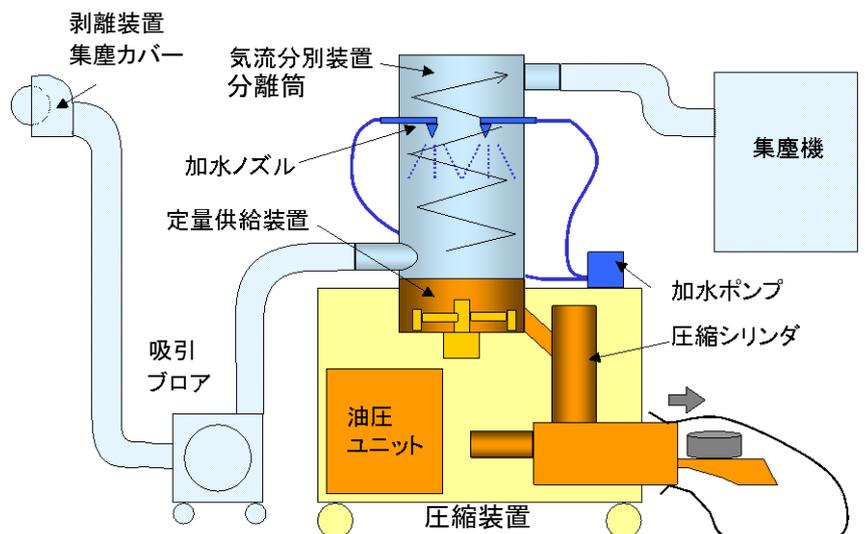


図 4.3-1 気流分離装置の概要

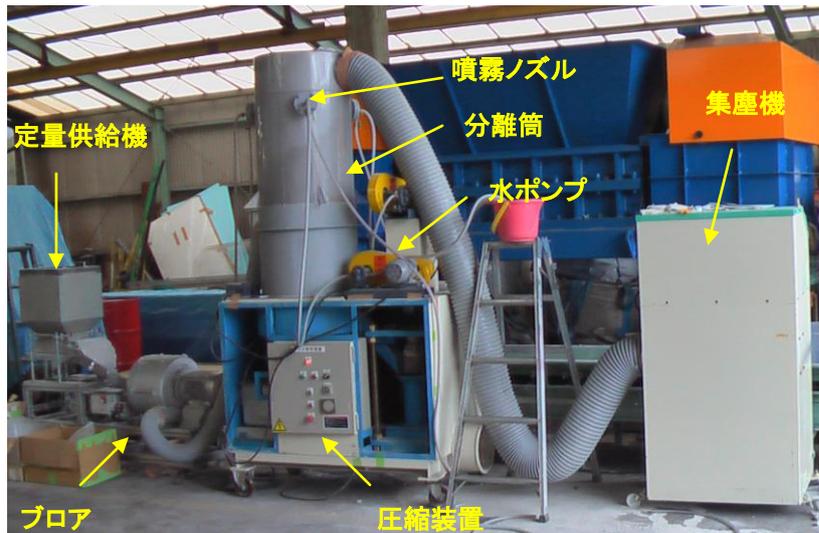


図 4.3-2 気流分離装置試作機



図 4.3-3 分離実験の状況

4.3.2 サイクロン分離方式

もう一方の分離方法として図 4.3-4 に示すサイクロン分離方式を検討した。サイクロン分離方式は、剥離したアスベストが混入した空気をサイクロンに送り、遠心力で分離して下部のホッパに回収する。サイクロン稼動時には空気の流路全体が密閉されている必要があるため、ホッパからの排出は吸引ブロアを止めるバッチ式か、機密性の高いロータリバルブにより連続的に排出する必要がある。本開発システムではロータリバルブを用いた連続排出とした。サイクロン方式で微細な粒子をどの程度分離可能か確認するため、図 3.4-5 に示す小型のサイクロンを試作して分離実験を行った。

性能確認実験の結果、粉体状のアスベスト剥離物は重量比 98%以上がサイクロンで回収されることが分かった。サイクロンで分離できなかった微細な粉塵はフィルタで回収する。

4.3.3 分離装置の選定

以上の検討結果から、気流分離方式は剥離アスベストの量と噴霧による加水量の管理を精度よく行うことが難しいこと、サイクロン方式で微細な粉体を十分連続的に分離可能であることから、本開発システムではサイクロン分離方式を採用した。

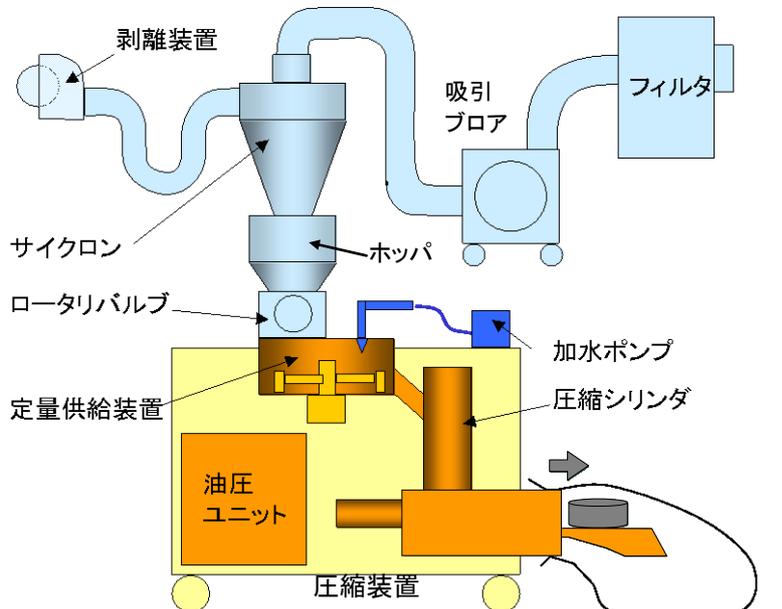


図 4.3-4 サイクロン分離装置の概要



図 4.3-5 小型サイクロンおよび吸引ブロア

4.4 圧縮装置

ホイールブラシによる粉体状に剥離することで減容化することが考えられる。手作業による剥離では吹付けアスベストの剥離は、スクレーパ等を用いて図 4.4-1(a)に示すようにブロック状に掻き落とすことになるが、本システムのホイールブラシによる剥離では図 4.4-1(b)に示すように粉体状に剥離粉砕される。両者のかさ比重を測定するとロボットシステムでは従来の手作業の約 1/2 の体積に減容化されることが分かった。



(a) 手作業の場合



(a) ロボットシステムの場合

図 4.4-1 剥離物の状況

次に、図 4.4-2 に示す一軸圧縮装置を使って湿式吹付けロックウールを粉砕した試験体による圧縮実験を行った。圧縮実験結果をまとめて表 4.4-1 に示す。湿式アスベストをホイールブラシで粉体状に剥離粉砕することで従来の人手によるブロック状の剥離物より約 1/1.9 の減容化が実現される。さらに重量含水比約 20%になるように適切な水分を加えて、一軸圧縮装置により 6.9Mpa の圧力で圧縮することで約 1/1.6 に減容化される。よって、両方合わせた体積は約 1/3.1 に減容化となり目標値の 1/3 を達成することができる。

微細な粉体状の湿式吹付けロックウール試験体では、加水量が多く重量含水率約 30%に加水した試験体ではヘドロ状になり、圧縮による過剰水の脱水は困難であった。また、加水量が少ない重量含水率約 16%の試験体では、水分が全体に行き渡らず固まらない状態であった。湿式アスベストの粉体状の剥離物を圧縮固化するためには、シビアな加水量のコントロールが必要であると考えられる。

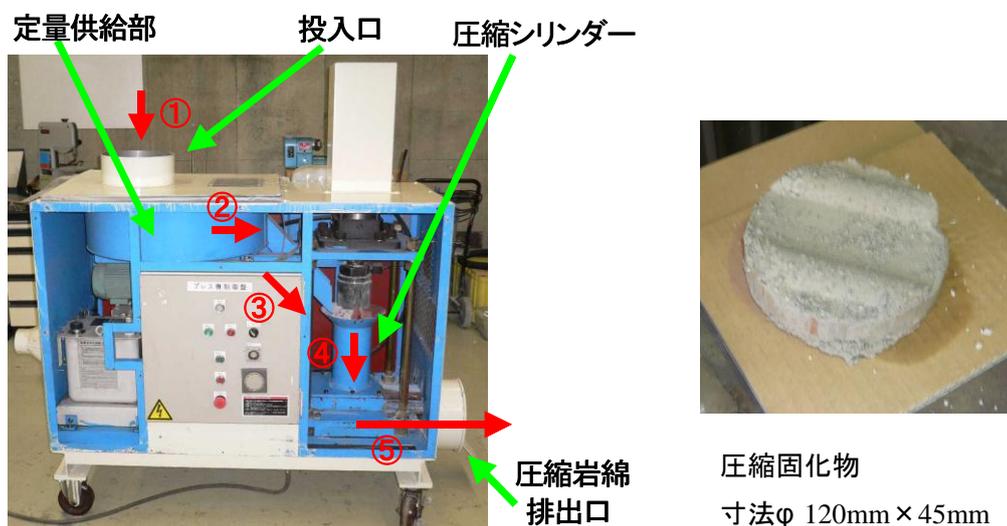


図 4.4-2 一軸圧縮装置の概要

表 4.4-1 圧縮実験結果

	かさ比重	一軸圧縮 減容化	合計減容化 (②×③/①)
ロボットによる粉体状態	① 0.64	③ 1/1.6	1/3.1
手作業によるブロック状態	② 0.33	—	—

5. 剥離実証実験

5.1 実証実験用試作システムの概要

試作したアスベスト処理ロボットシステムの性能を確認するため、実大の鉄骨梁モックアップを用いて実際の剥離作業と同等な剥離実験を行った。試作システムは図 5.1-1 に示すように剥離ロボットと回収・梱包装置から構成されている。実験ではロックウールを使用するため回収・梱包装置は隔離領域外に設置した。図 5.1-2 に剥離ロボットを示し、図 5.1-3 に回収・梱包装置、図 5.1-4 に吸引ブローア、表 5.1-1 に主な機器の仕様を示す。

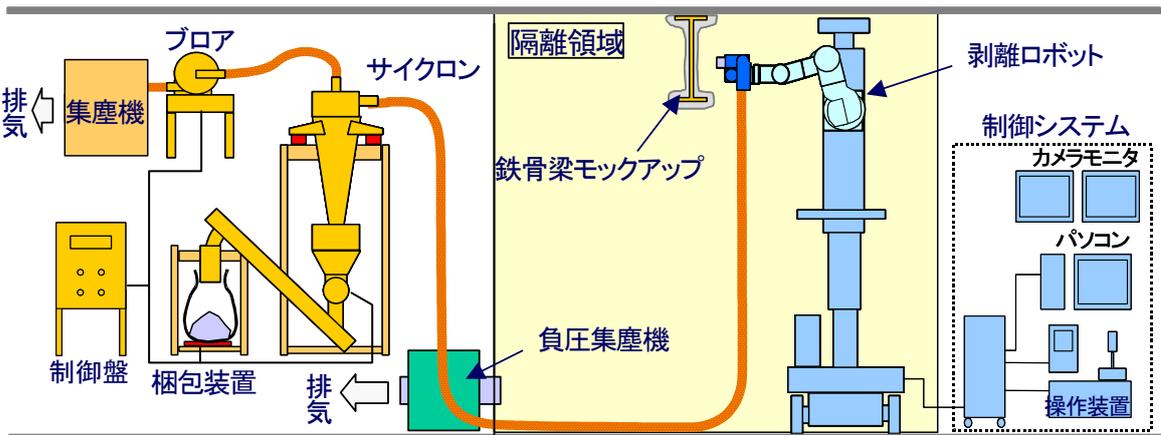


図 5.1-1 実証実験用試作システムの概要



図 5.1-2 剥離ロボット全景



図 5.1-3 回収梱包システム



図 5.1-4 吸引ブロア

表 5.1-1 回収・梱包システム機器の主な仕様

機 器	仕 様
吸引ブロア	動力 4.0kw、最大風量 5.2m ³ /min、最大静圧 38kPa
ロータリバルブ	排出量 0.013m ³ /min、ロータ 径φ 128×幅 90(mm)
スクリーンコンベヤ	排出量 0.013m ³ /min、径φ 100、P = 100、搬送率 30%(概算)
梱包装置	設定荷重①でアラーム、設定荷重②でシステム自動停止

隔離領域からの粉塵漏出を防ぐため図 5.2-5 に示す負圧集塵機（静圧 3.1kpa、最大風量 60m³/min）を設置した。実験時の粉塵を速やかに排出するためサイズの大きな集塵機を設置したため、環境測定時には流量を絞って実験を行った。



図 5.1-5 実大実証実験室負圧集塵機

剥離装置集塵カバーと剥離対象との隙間が大きい剥離開始時に、粉塵が多く発生するため、剥離装置の前方に向けてミストノズルを取り付けて粉塵飛散の防止を図った。図 5.1-6 にミストノズル（吐出量 0.07L/min）、図 5.1-7 に噴霧ポンプ（最大圧力 2.5Mpa、最大吐出量 1.9L/min）を示す。

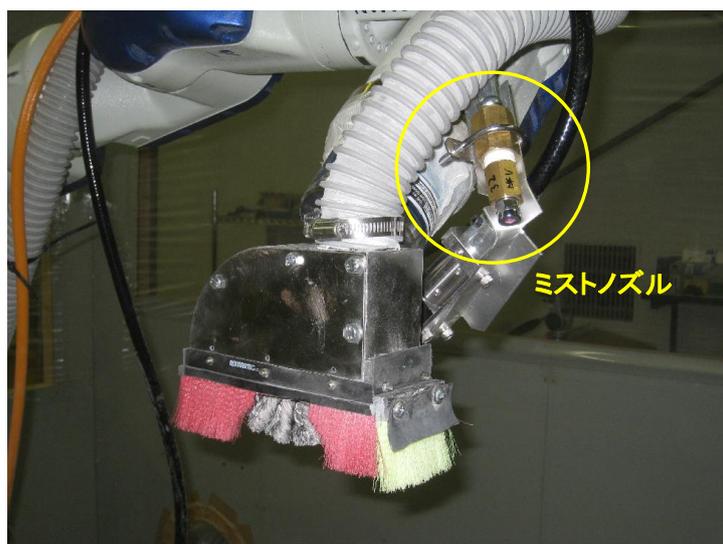


図 5.1-6 ミストノズル



図 5.2-7 噴霧ポンプ

5.2 実大規模鉄骨モックアップの製作

実大規模の実証実験を行うため、鉄骨梁のモックアップを製作した。実験時の粉塵の外部飛散を防止するため屋内に外寸法で幅6.7m×奥行5m×高さ3.7mの鉄骨フレームを組み、パネルとポリシートで密閉した実大実証実験室を製作した(図5.2-1)。実大実証実験室全景を図5.2-2、実大実証実験室内部状況を図5.2-3に示す。実験室の中に鉄骨梁モックアップとしてH型鋼(H-488×300×11×18)を鉄骨下端の高さが3mとなるように設置した(図5.2-4)。鉄骨梁は交換できるようになっておりアスベストの代替として厚さ25mmの湿式吹付けロックウールを吹付けて1ヵ月以上養生した。吹付け厚さは20mm～50mm程度のばらつきがあり、ロボット剥離性能の定量的な確認が難しいと考えられるため、定量的な剥離性能を把握するため1m×1mの鉄板に厚さ20～25mmにコテ塗りした平板モックアップを天井面に取り付けた(図5.2-5)。

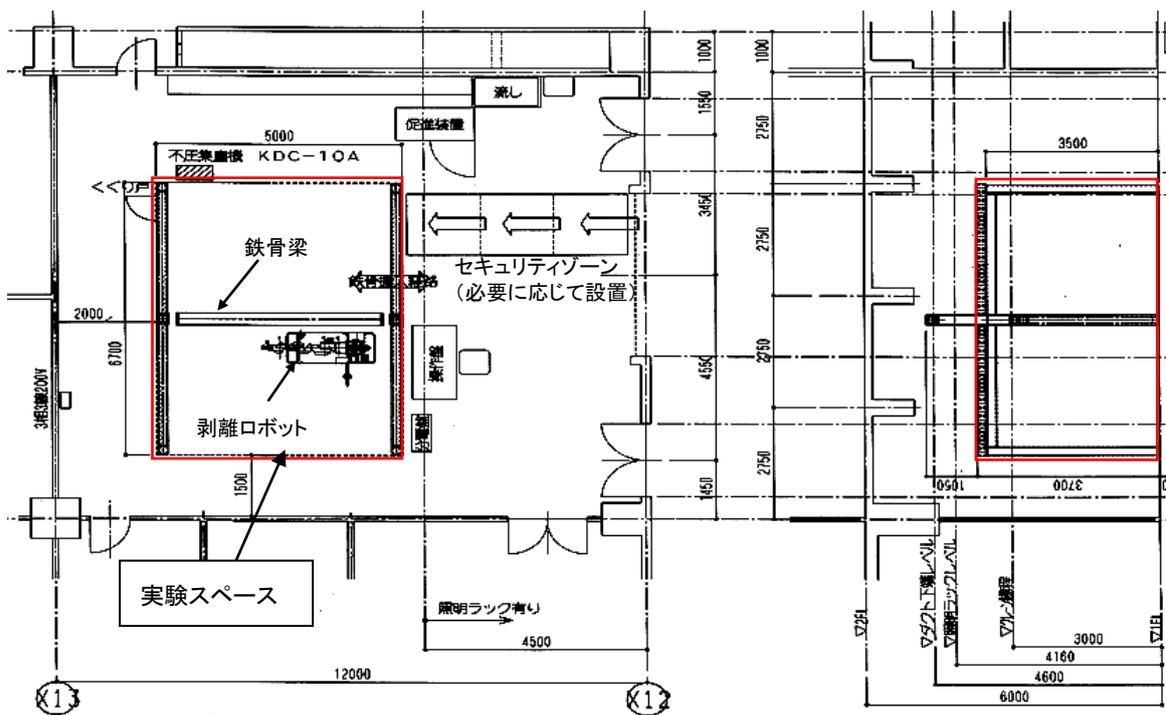


図 5.2-1 実大実証実験室の概要



図 5.2-2 実大実証実験室全景



図 5.2-3 実大実証実験室内部状況



図 5.2-4 実大鉄骨梁モックアップ



図 5.2-5 平板モックアップ

5.3 剥離実証実験

5.3.1 モックアップ剥離実験

試作したアスベスト剥離処理ロボットシステムにより、パソコンのシミュレーションソフトでオフラインティーチングによりジョブプログラムを作成し、剥離ロボットを作業位置に設置して、剥離装置を動作させない空運転による動作確認を行った後、プレイバックによる自動剥離を実行した。剥離装置は径 125mm φ、幅 50mm、3000rpm のホイールブラシを使用した。剥離実験状況を図 5.3-1 に示す。



図 5.3-1 剥離実証実験状況

鉄骨梁モックアップ試験体を剥離した結果、押し付け力 20N、剥離目標軌道を鉄骨表面 -20mm（表面よりさらに 20mm 先の位置）の設定で剥離速度 50mm/min の剥離が可能であり 9m²/h の剥離能力が得られたが、力制御による押し付け力が安定するまで時間を要し、安定する前に剥離を開始すると初期に剥離残しが生じるという現象が起きた。図 5.3-2 に剥離状況を示す。力制御起動後の試験体へ向かう速度を 10mm/sec に設定し、鉄骨表面まで進んだ後に力制御が安定するまでタイマーを 5 秒設けることで、これらの現象をほぼ回避することができた（図 5.3-3）。これらのパラメータは対象物の種類や固さなどの物性により最適値が異なるものと考えられ、実際の施工時には現地でテストして調整する必要がある。

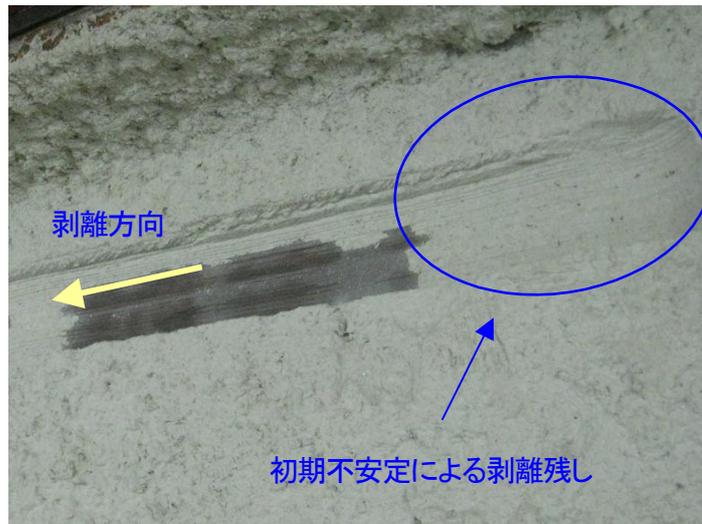


図 5.3-2 初期不安定による剥離残し



図 5.3-3 剥離状況

本システムの剥離装置能力は剥離厚さが最大 35mm であり、35mm を超える場合は 2 回繰り返し剥離する必要がある。また、剥離実験で使用した梁せいが 488mm 鉄骨梁では、マニピュレータの姿勢により天井との干渉が生じるため、鉄骨梁全面を剥離するためにはその干渉を回避するための剥離手順が必要であった。剥離手順は図 5.3-4 に示すように、天井面にマニピュレータが干渉部分は剥離装置を 15° 傾斜させ、剥離装置のギアボックスの当たりを避けるため図の①～⑬の順序で剥離を行う。剥離装置の傾斜による剥離残しと吹き付け厚さが 35mm を超える部分の剥離残しは、同じ作業を繰り返すことでほぼ全面の剥離が可能であった（図 5.3-5）。剥離装置の集塵カバーが鉄骨と干渉するため鉄骨の入隅部に約 20mm の剥離残しが生じた（図 5.3-6）。

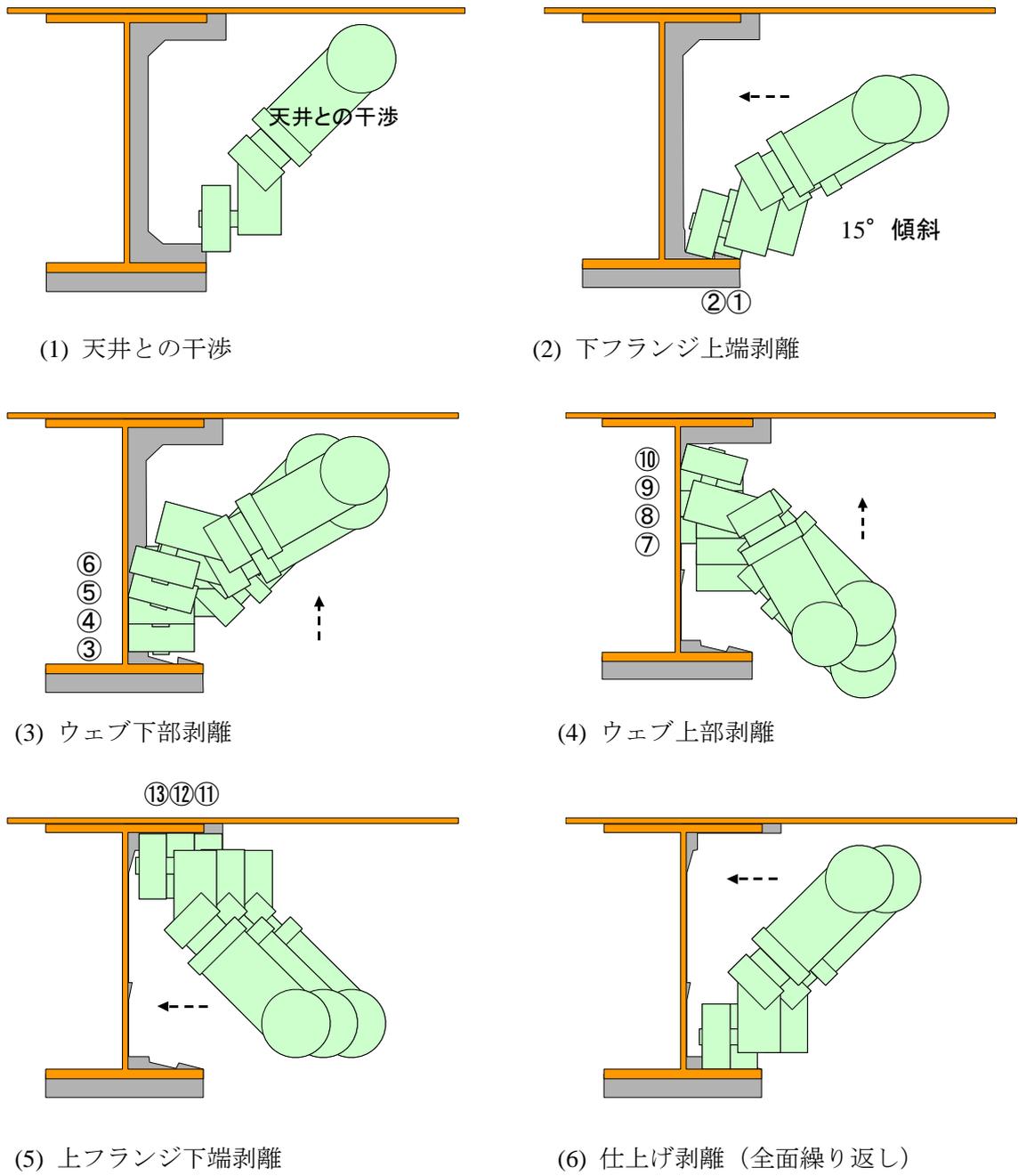


図 5.3-4 鉄骨梁剥離手順



図 5.3-5 全面剥離後の状況



図 5.3-6 入隅部の剥離残り状況

次に、天井面に取り付けたロックウール吹き付け厚さ 20～25mm の試験体を剥離した結果、押付け力 20N、剥離目標軌道を鉄骨面-20mm（鉄骨面よりさらに 20mm 先の位置）の設定で剥離速度最大 100mm/sec の剥離が行え、18m²/h の剥離能力が得られた。また、鉄板面まで達する剥離が行われており、1回で十分仕上げ剥離まで可能であった。図 5.3-7 に剥離状況を示す。



図 5.3-7 平板モックアップ剥離実験状況

5.3.2 障害物回避機能を用いた剥離実験

障害物回避機能の動作の可能性を検討するために、鉄骨梁モックアップに図 5.3-8 に示すジョイント部を設けて障害物回避機能を使って剥離実験を行った。押し付け力 20N、剥離速度 25mm/sec、障害物回避高さ 20mm、回避長さ 50mm で剥離実験を行った結果を図 5.3-9 に示す。ジョイント部を乗り越える回避動作は十分可能であったが、障害物接触時の抵抗で剥離装置が停止する、障害物回避動作による剥離装置の浮き上がりによる剥離残しが多い、回避動作に時間がかかるなどの問題が把握できた。本システムで使用しているマニピュレータの制御システムではこのような使用方法が想定されていないため、現状では信号処理に時間がかかり、改善するためにはマニピュレータの基本制御ソフトを改造する必要があるため、今回は問題を解決することは困難であったが、障害物回避機能の可能性を確認することができたと考えられる。

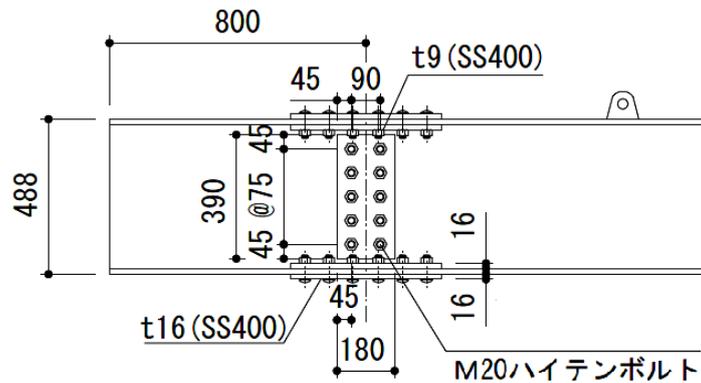


図 5.3-8 鉄骨モックアップジョイント部概要



図 5.3-9 障害物回避機能を用いた剥離実験

5.3.3 環境測定

本開発システムによる剥離実験時の環境測定として、図 5.3-10 に示すように剥離作業付近、負圧集塵機付近および隔離区域外の操作卓付近の 3 ヶ所にフィルタを設置して PCM 法によるロックウール繊維濃度の測定を行った。実証実験室の容積は 117m³ あり、1 時間に 4 回換気するための負圧集塵機の必要な能力は 7.8m³/min となるため、実証実験室で使用している集塵機 (60m³/min) の吸引口を 7cmφ に絞り、吸引ダクトに 15cmφ の穴を開けて外気を吸引することで 10.7m³/min (計算値) の吸引能力とした (図 5.3-11、図 5.3-12)。

剥離装置における剥離物の吸引により、剥離装置のシールブラシが吹付け材に接触している状態では粉塵発生はほとんど見られなかったが、剥離開始時などで隙間が開く場合に若干の漏出が見られた (図 5.3-13)。剥離開始時などの粉塵発生防止を目的としたミスト噴霧を行う場合 (5.1 参照) と行わない場合を比較した。環境測定結果を図 5.3-14 に示す。繊維濃度測定結果は、ミストなしの場合は排気近傍で 0.088 本/cm³ で、作業直近で 0.183 本/cm³、ミストありの場合は排気近傍で 0.034 本/cm³ で、作業直近で 0.079 本/cm³ であった。参考として 2006 年度の委託事業における研究開発課題で測定した人力作業 (半湿式吹き付けロックウール) の結果を示した。剥離装置からの直接吸引とミスト噴霧を加えることにより空气中繊維濃度を低減し、周辺への繊維の飛散拡散を大幅に削減して目標値 0.1 本/cm³ を達成することができた。

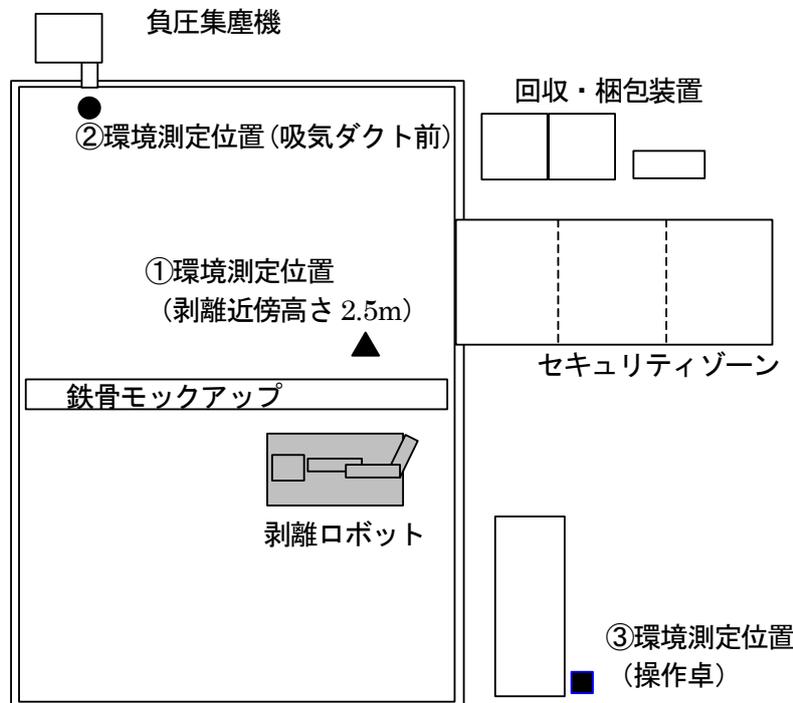


図 5.3-10 環境測定位置

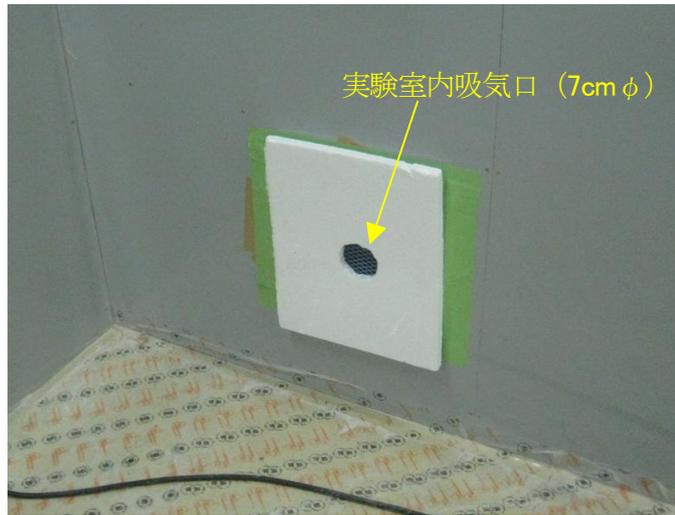
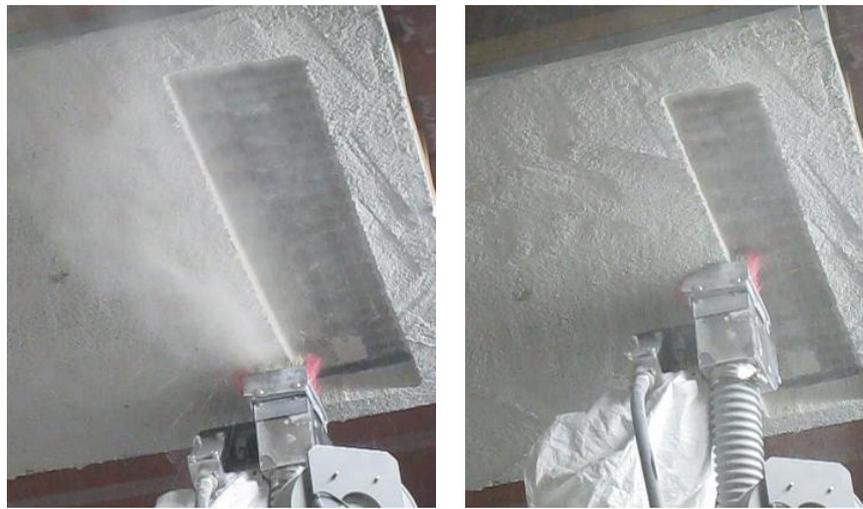


図 5.3-11 実験室内吸気口



図 5.3-12 集塵機ダクト部の外気吸気口



(a) 剥離開始時の粉塵発生 (b) 一般部剥離時の状況

図 5.3-13 剥離時の粉塵発生状況

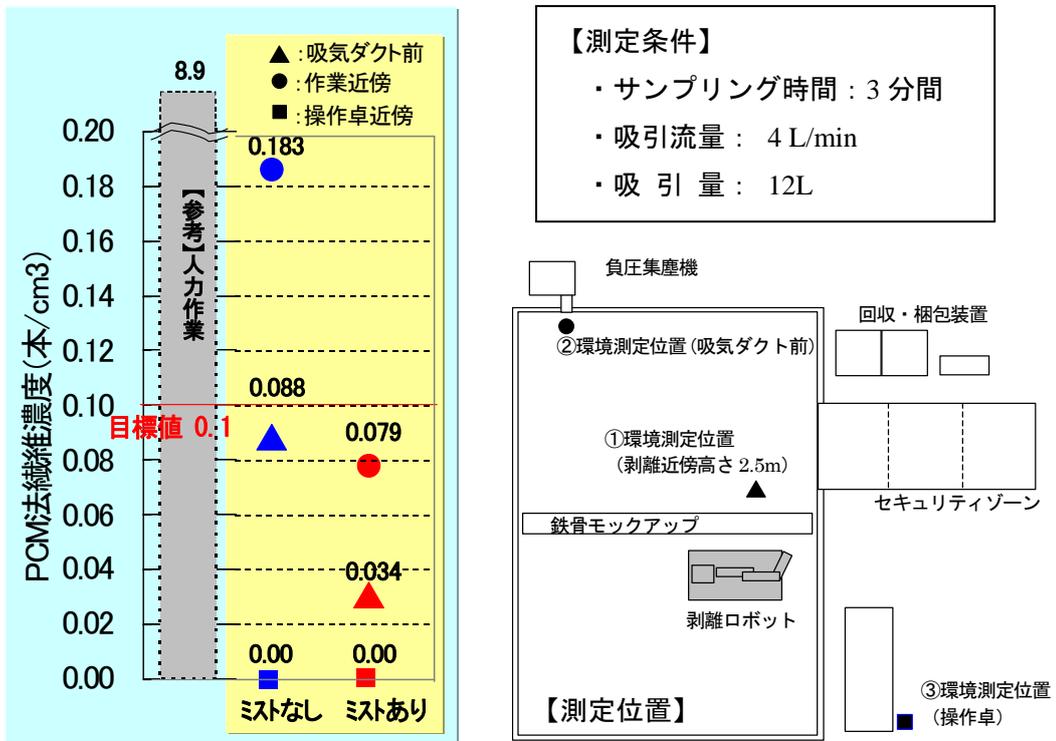


図 5.3-14 環境測定結果 (PCM 法評価)

6. 実用化に資するビジネスモデルの策定

人手作業によって行われている現在のアスベスト除去工事に対し、開発したロボットシステムでは安全性の向上を最上位の目的としているが、一方では、事業として採算性の取れるシナリオが当然ながら求められる。

ロボットシステムを用いたビジネスモデルを策定する上で、人手による在来工法との比較検討は欠かせないが、考慮すべき条件は後述の通り、非常に複雑かつ広範に及び、また、各工事現場によっても事情は大きく異なってくる。

従って本章では、ロボットシステムによるビジネスモデルの可能性、事業成立性の一つの目安を得るために、検討用のモデル現場、並びに、各種パラメータ（ロボット台数、配置要員、剥離効率、単価等）を設定し、その条件下で工期、コスト等の概略試算と在来工法との比較を行う。

6.1 標準的な作業フロー

アスベスト除去工事は飛散・曝露防止のために、法令で定められた手順に則って行う必要がある。現行の人手作業による標準的なフローチャートを図 6.1-1 に示す。

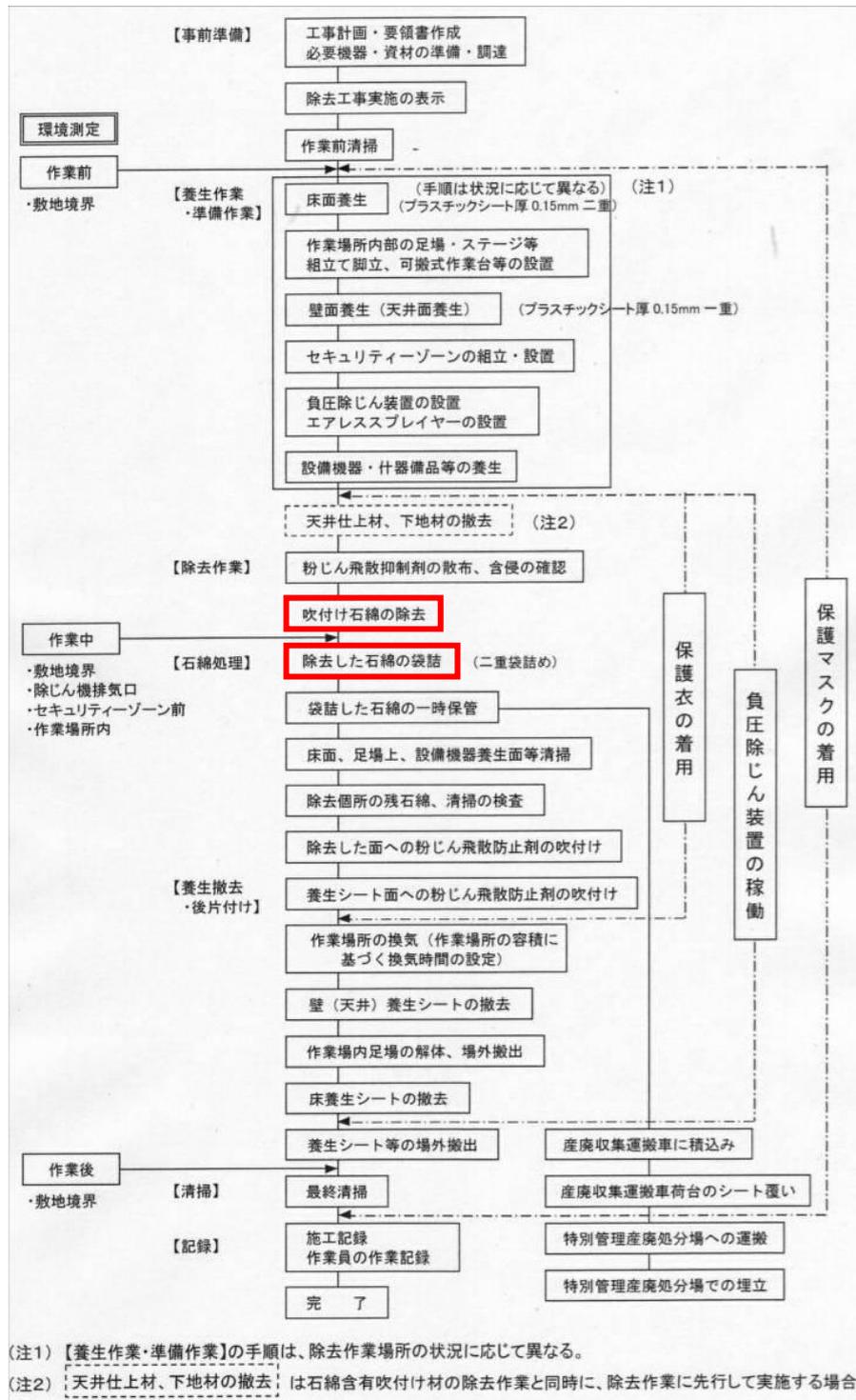


図 6.1-1 石綿含有吹付け材の除去作業のフローチャート
(「石綿粉塵への曝露防止マニュアル」建設業労働災害防止協会より)

開発したロボットシステムを適用する場合についても、図 6.1-1 の作業フローに基づいて事前準備、養生作業並びに、工事終了後の養生の撤去作業等が同様に発生する。人手作業と異なるのはアスベストの剥離作業と、剥離したアスベストの袋詰（圧縮・梱包）の工程である（図 6.1-1 中の赤枠部分に該当）。さらにロボットを適用する場合、ロボットの搬入・組立・設置作業、及び、工事終了後の搬出作業が別途に必要となる。

実証実験結果に基づいて、ロボット適用時の標準的な作業フローおよび各作業の所要時間を図 6.1-2 に示すように設定した。すなわち、ロボット 1 台あたり、搬入・組立・設置に約半日（4 時間）、同様に撤去・搬出に約半日（4 時間）を要する。また、梁 1 スパンの中でロボットの固定作業等を除く剥離作業時間を 20 分/時間、また、別通りスパンへのロボットの大きな移動・盛替えを 3 回/日（所要時間 30 分/回）と考えると、1 日あたりの剥離作業時間は、2.5 時間/日と算出される。

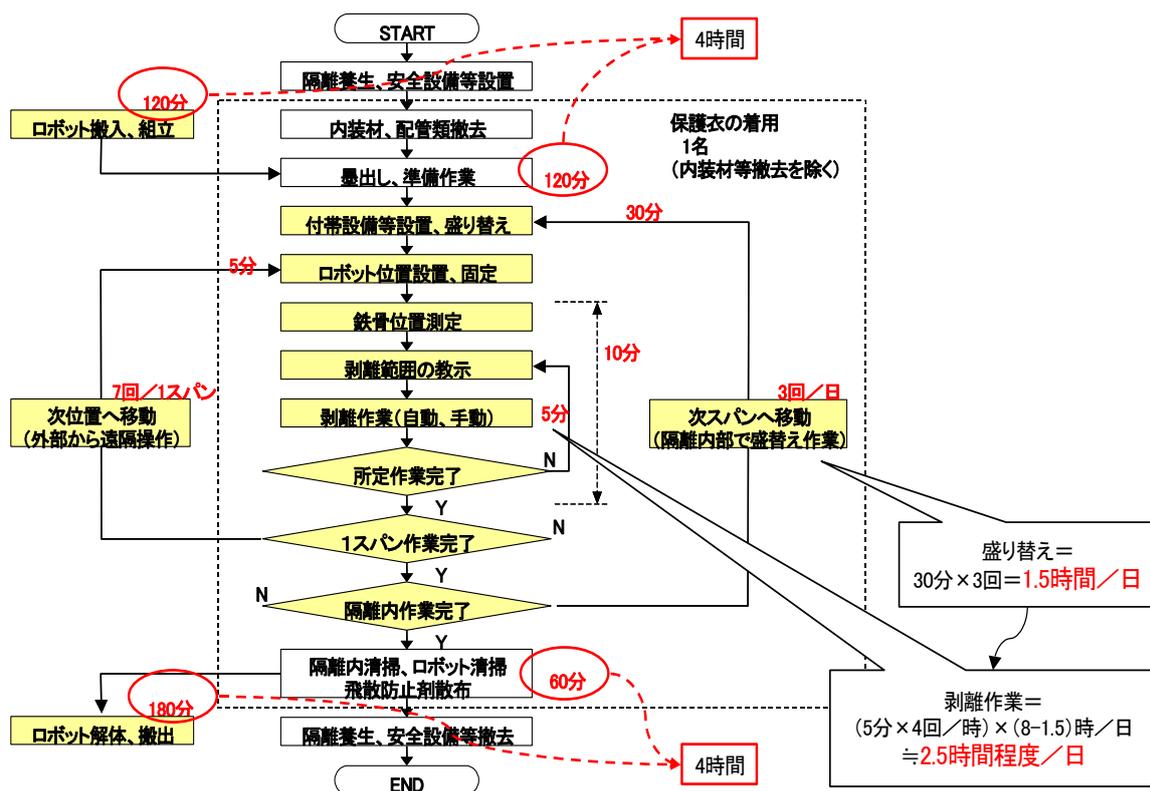


図 6.1-2 ロボット適用時の標準的な作業フローと所要時間

6.2 検討用モデル現場の設定、及び、工期・コストの試算

現行の人手作業によるアスベスト除去工事と、開発したロボットシステムを適用した場合の比較検討を行うため、検討用にモデル現場を設定すると共に、概略の工期・コストの試算を行った。

6.2.1 検討用モデル現場の設定

検討用のモデル現場として、図 6.2-1 に示す基準階プランの鉄骨造ビルを想定した。ここでは、鉄骨梁に吹付けられた湿式アスベスト（厚さ 35mm）を対象とし、建物 1 フロアのアスベスト剥離工事に対して検討を行う。

前工程（準備、天井下地・ダクト類の撤去、養生等）、並びに、後工程（養生の撤去等）の各作業については、人手作業とロボット適用時で共通と考え、アスベスト除去に直接関わる作業について比較を行った。また、剥離作業開始時の現場条件として、図 6.2-2 に示すように、天井、下地、並びに、ダクト配管類は全て撤去されているものとした。

検討用モデル現場の条件を以下に記す。

■基準階面積	約 2,500 m ²
■階高	階高 3,750 mm
■アスベストの条件	湿式アスベスト／厚さ 35 mm
■アスベスト吹付け部	鉄骨大梁、及び、小梁
■アスベスト被覆面積	約 2,100 m ² ／階
／内訳	大梁： 2.1 m ² /m（単位長当り）×804 m（総延長／階） 小梁： 1.4 m ² /m（同）×324 m（同）

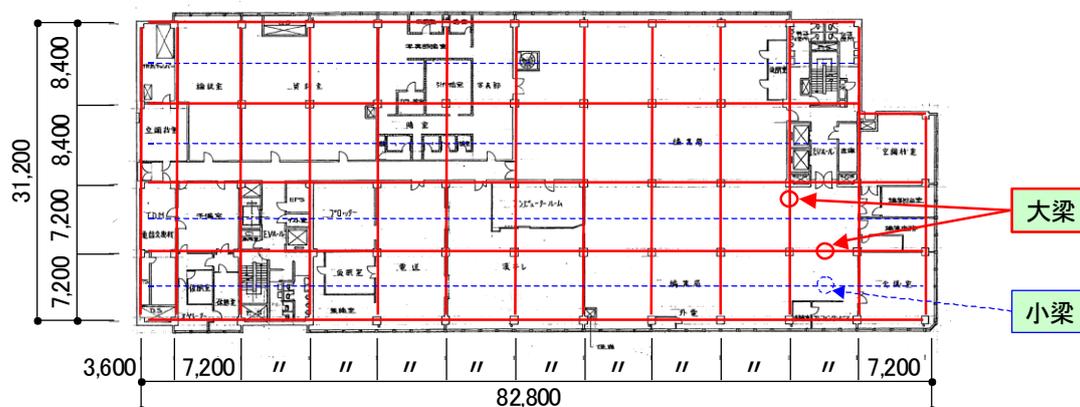


図 6.2-1 検討用モデル現場の平面図（1フロアあたりでの検討）



図 6.2-2 現場の状況・イメージ

6.2.2 人手作業の場合の試算結果

まず、検討のベースとなる現行の人手作業の場合について試算を行う。試算を行う上で最も難しい点は、人手作業の剥離効率の設定である。当然ながら、現場の条件（階高、足場、作業スペース、設備配管の有無等）、アスベストの条件（湿式・乾式、厚さ）、アスベスト吹付け部位（梁、壁、天井）、作業員の経験他、多くの要因で剥離効率は大きく変化する。実際、これまでに公表されている各種資料（例えば、BCS：「建設作業のロボット化に関する調査研究報告書（その11）」（H15.6）、P70等）によると、剥離効率は4～20m²/人・日と非常に大きくばらついている。従って、本検討では上記図 6.2-1、6.2-2 の検討用モデル現場の条件に対して、工事専門業者へのヒアリングを行い、これまでの経験から妥当と判断される剥離効率として10m²/人・日を設定した。

設定した条件について、全工事項目に対するコスト並びに、剥離作業部分（除去工事）に対する工数、工期、及び、コストの試算結果を表 6.2-1 に記す。また、全工事に対する各工事費用の内訳を図 6.2-3 に示す。

表 6.2-1 人手作業の試算結果（剥離効率 10 m²/人・日）

試算項目	試算結果	備考
工数（除去工事）	210 人・日	=2,100 m ² /（10 m ² /人・日）
工期（除去工事）	21 日	10 人組の想定
コスト（除去工事）	約 750 万円	飛散抑制剤吹付け作業等を含めれば、 約 1,500 万円
コスト（全工事）	約 4,870 万円	アスベスト単位面積あたり、約 2.3 万円/m ²

除去工事関連の占める割合は全体の 3 割程度であり、副資材・消耗品や産廃処理に比較的多くの費用がかかることが知れる。

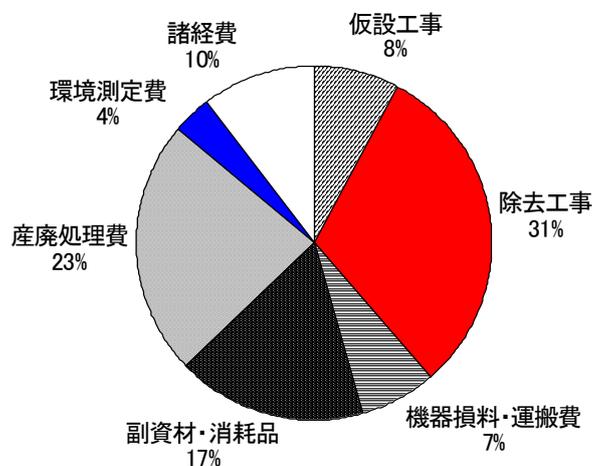


図 6.2-3 工事費用の内訳（人手作業、湿式アスベスト対象）

なお、工事費用の一つの目安として、図 6.2-4 に示す、国土交通省の報道発表資料がある。同資料に拠れば、アスベスト処理面積が 1,000 m² 以上の場合（本検討は 2,100 m²）、10,000 ～30,000 円/m² であり、上記結果（約 23,000 円/m²）は妥当な範囲であると言える。

平成20年4月25日

石綿(アスベスト)除去に関する費用について

平成19年1月から平成19年12月の1年間における、施工実績データ(別紙)より算出。

吹き付けアスベスト処理費用(1m²あたり単価)の目安としてはおおよそ以下の通りである。(仮設、除去、廃棄物処理費等全ての費用を含む)

1. アスベスト処理面積300m²以下の場合
20千円/m² ～ 85千円/m²
2. アスベスト処理面積300m²～1,000m²の場合
15千円/m² ～ 45千円/m²
3. アスベスト処理面積1,000m²以上の場合
10千円/m² ～ 30千円/m²

図 6.2-4 アスベスト除去工事費用 国土交通省・報道発表資料より
(http://www.mlit.go.jp/report/press/sogo13_hh_000002.html)

6.2.3 ロボット作業の場合の試算結果

次に開発したロボットシステムを適用した場合について検討する。

ロボット適用時の究極の目標は、「100%ロボット化・完全無人化」であるが、実際の工事現場には作業スペースの確保、障害物の存在、床面の段差他、多くの制約条件や特殊条件があるのが常であり、無理にロボットを使うことはむしろ非合理になると言える。また、剥離作業の前後工程では養生やロボットの搬出入等、人手に頼らざるを得ない作業が必ず発生するため、これらの作業要員も剥離工事にうまく活用してロボットと人手作業の平準化を図った方が、コスト及び、工期的に合理性は高くなる。

以上の観点から現実的、かつ、ロボット利用のメリットが十分生かせるシナリオとして、剥離作業が比較的容易な平坦な部位（鉄骨梁の一般部）についてはロボット、一方、ロボットの作業効率が大きく低下する複雑な部位（柱梁接合部、ボルト周り、設備配管用の貫通口等）については人手作業とする、組合せ方式を基本と考える。

なお、ロボットと人手作業の組合せ方（作業比率）は各工事現場の条件により様々なパターンが考えられるが、図 6.2-5 に示すように鉄骨梁の一般部と接合部・開口箇所面積比率は 80%対 20%程度であるケースが多いので、ここでは図 6.2-6 に示す通り、アスベスト面積比に対して 80%をロボットで、残りの 20%を人手で剥離するシナリオを設定した。

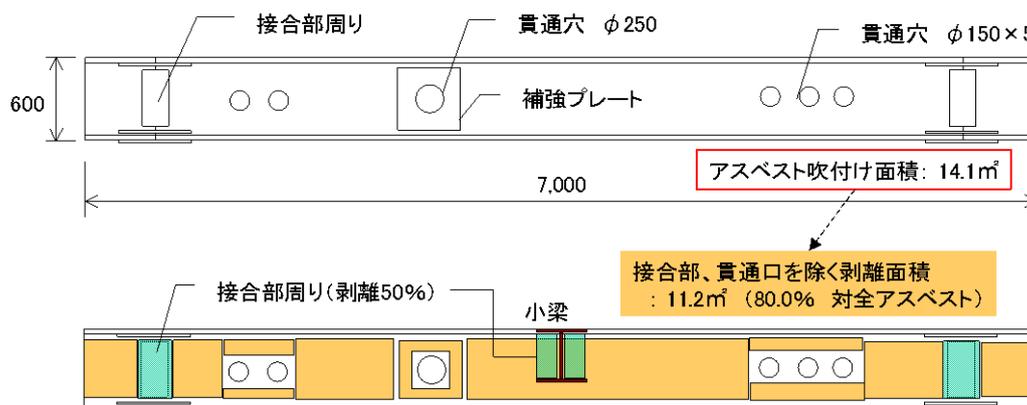


図 6.2-5 鉄骨梁における一般部と接合部・開口箇所の面積比の例

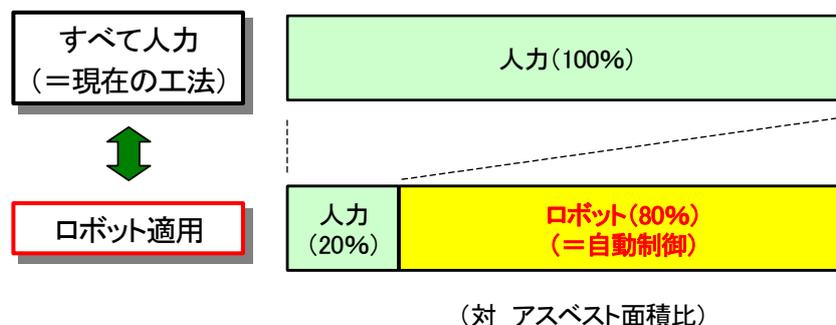


図 6.2-6 ロボット適用のシナリオ（ロボットと人力の剥離作業比率）

ロボットの場合についても剥離効率の設定をはじめ、ロボット台数、要員の配置パターン等、多くのパラメータが存在し、かつ、これらは各現場条件に大きく左右されるため、条件を下記に限定して比較検討を行うこととした。

ロボットの搬出入工数（6.1 節参照）、及び、剥離効率については、過去に実施した室内、及び、現場での実証実験結果をベースに設定すると共に、図 6.2-7 に示すようにモデル現場の規模を考慮して、ロボット台数は 2 台、相判要員はロボット 1 台につき 1 人とする。また、ロボットは用意したジョブプログラムにより自動運転されるため、オペレータ要員 1 人が 2 台のロボット監視する条件とした。なお、ロボット相判要員は、主に配線の取り回しやロボット位置確認、トラブル時の対応等を担当するが、空き時間には剥離作業も兼務するものとする。従ってアスベスト全体の 20%にあたる人力剥離部分は、この相判要員と別途に投入する専用要員が共同で作業を行う。

また、作業時間として通常の場合（昼間 8 時間）と、ロボット特性を生かした 24 時間稼働の 2 つのケースに対して試算を行った。なお、24 時間稼働のケースにおける専用要員による人力剥離は、昼間（8 時間）のみの作業と考えた（相判要員による剥離は 24 時間）。

設定した各種条件・パラメータを表 6.2-2～4 に示す。

表 6.2-2 ロボット台数、要員数の条件

項目	設定条件	備考
ロボット台数	2 台	
ロボット搬入工数	2 人・日/2 台	
ロボット搬出工数	2 人・日/2 台	
ロボット相判要員	2 人	1 人/1 台
ロボットオペレータ	1 人	1 人/2 台
人力剥離の専用要員	3 人/日（通常） 6 人/日（24 時間稼働）	【補足 1、2】参照

表 6.2-3 剥離効率の条件

項目	設定条件	備考
ロボット（通常）	45 m ² /台・日	室内実験結果（18 m ² /台・時）×剥離作業時間（2.5 時間/日）
ロボット（24 時間）	135 m ² /台・日	通常の 3 倍
人手（専用要員）	10 m ² /人・日	前項 6.2.2 に同じ
人手（相判要員）	5 m ² /人・日	専用要員の半分の想定

表 6.2-4 単価の条件

項目	設定条件	備考
ロボット（通常）	10 万円／台・日	
ロボット（24 時間）	15 万円／台・日	通常の 1.5 倍の想定
ロボット・精密機器 清掃費	15 万円／台	
人件費（通常）	3 万円／人・日	
人件費（夜間）	4.5 万円／人・日	通常の 1.5 倍の想定

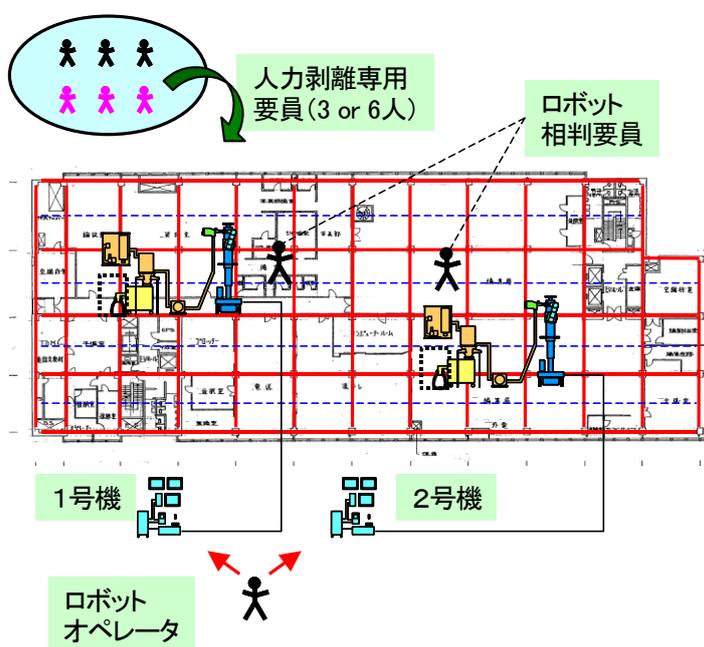


図 6.2-7 ロボット適用時の条件（ロボット 2 台、相判 2 名、オペレータ 1 名）

剥離作業（除去工事）に対し、人力（専用要員と相判要員）による剥離作業の総工数（＝安全性の指標に相当するもので、本工数が少ないほど人間がアスベストに触れる時間も少なく安全性が高い）、工期、及び、コストの試算結果を、前項 6.2.2 の人手作業の場合に対する比と併せて、表 6.2-5～6 に示す（計算の詳細は【補足 1、2】参照）。

表 6.2-5 ロボット作業の試算結果（通常の場合） 【補足 1】 参照

項目	設定条件	全て人手作業の場合に対する比
人力剥離の総工数 （安全性の指標）	61 人・日	= 0.29 ×全て人手
工期	21 日	= 1.00 ×全て人手
コスト	693 万円	= 0.92 ×全て人手

表 6.2-6 ロボット作業の試算結果（24 時間稼働の場合） 【補足 2】 参照

項目	設定条件	全て人手作業の場合に対する比
人力剥離の総工数 (安全性の指標)	61 人・日	= 0.29 ×全て人手
工期	9 日	= 0.42 ×全て人手
コスト	583 万円	= 0.78 ×全て人手

これらの試算結果より、現状の人手作業に対して工期・コストは同等のレベル、安全性（人力剥離作業の総工数）は大幅な向上が見込めることが分かる。特に 24 時間稼働の場合、工期の大幅な短縮が可能であることを示唆しており、ロボット特性を生かせるシナリオとして有効であると言える。

なお上記検討は、ロボット適用時の一つの目安になるものではあるが、想定したモデル現場における、想定したパラメータ・条件下での結果である。先述の通り、扱うパラメータが非常に多い上に、個々の工事現場には現場ごとの特殊条件があり、また、数値化が難しい要素も多い（他種工事からの制約、必要要員の確保、施主の理解・協力等）。

事業を軌道に乗せるためには、ロボットを実際の工事現場に適用し各種データを収集する中で、施工効率やコストの予測精度を高めていくことが欠かせない。これらについては今後の課題としたい。

【補足 1】 計算の詳細（通常の場合）

・人力による剥離面積 $2,100 \times 0.2 = 420 \text{ m}^2$. . . ①

・ロボットによる剥離面積 $2,100 \times 0.8 = 1,680 \text{ m}^2$. . . ②

・工期

$1,680(=②) / (2 \text{ 台} \times 45 \text{ m}^2 / \text{台日}) + 1 \text{ 日 (搬入)} + 1 \text{ 日 (搬出)} = \boxed{20.7 \text{ 日}}$. . . ③

・ロボットによる剥離作業期間内に、ロボット相判要員だけで剥離できる面積
 $(20.7(=③) - 2) \text{ 日} \times 2 \text{ 人} \times 5.0 \text{ (m}^2 / \text{人日)} = 186.7 \text{ (m}^2)$. . . ④

・人力剥離に必要な専用要員の工数
 $(420(=①) - 186.7(=④)) / 10 \text{ (m}^2 / \text{人日)} = 23.3 \text{ (人日)}$. . . ⑤
 ⇒専用要員 3 人を投入する。(専用要員の作業工期 $23.3 / 3 = 7.8 \text{ 日}$)

・人力剥離の総工数（専用要員＋相判要員）
 $23.3(=⑤) + 186.7(=④) / 5 \text{ m}^2 / \text{人日} = \boxed{60.6 \text{ 人日}}$. . . ⑥

・コスト（専用要員＋相判&オペ要員＋ロボット）
 $23.3(=⑤) \times 3 \text{ 万}$
 $+ (3 \text{ 人} \times (20.7(=③) - 2) + 2 \text{ 人日 (搬入)} + 2 \text{ 人日 (搬出)}) \times 3 \text{ 万}$
 $+ 20.7(=③) \times 2 \text{ 台} \times 10 \text{ 万} + 15 \text{ 万} \times 2 \text{ 台 (ロボット清掃費)} = \boxed{693 \text{ 万円}}$. . . ⑦

【補足2】計算の詳細（24時間稼働の場合）

・工期

$$1,680(=②) / (2 \text{ 台} \times 135 \text{ m}^2 / \text{台日}) + 1 \text{ 日 (搬入)} + 1 \text{ 日 (搬出)} = \boxed{8.2 \text{ 日}} \quad \dots \textcircled{8}$$

- ・ロボットによる剥離作業期間内に、ロボット相判要員だけで剥離できる面積

$$(8.2(=⑧) - 2) \text{ 日} \times 2 \text{ 人} \times 5.0 \text{ (m}^2 / \text{人日)} \times 3 \text{ (3 交替)} = 186.6 \text{ (m}^2) \quad \dots \textcircled{9}$$

- ・人力剥離に必要な専用要員の工数

$$(420(=①) - 186.6(=⑨)) / 10 \text{ (m}^2 / \text{人日)} = 23.3 \text{ (人日)} \quad \dots \textcircled{10}$$

⇒専用要員6人を投入する。(専用要員の作業工期 23.3/6=4日)

- ・人力剥離の総工数（専用要員+相判要員）

$$23.3(=⑩) + 186.6(=⑨) / 5 \text{ m}^2 / \text{人日} = \boxed{60.6 \text{ 人日}} \quad \dots \textcircled{11}$$

- ・コスト（専用要員（昼間のみ）+相判&オペ要員（昼間と夜間）+ロボット）

$$23.3(=⑩) \times 3 \text{ 万}$$

$$+ (3 \text{ 人} \times (8.2(=⑧) - 2) + 2 \text{ 人日 (搬入)} + 2 \text{ 人日 (搬出)}) \times 3 \text{ 万}$$

$$+ (3 \text{ 人} \times (8.2(=⑧) - 2) \times 2 \text{ (夜間 2 交替分)}) \times 4.5 \text{ 万}$$

$$+ 8.2(=⑧) \times 2 \text{ 台} \times 15 \text{ 万} + 15 \text{ 万} \times 2 \text{ 台 (ロボット清掃費)} = \boxed{583 \text{ 万円}} \quad \dots \textcircled{12}$$

6.3 事業化体制の構築

開発したロボットシステムの適用・展開に関して、検討した体制（案）を図 6.3-1 に示す。当社がロボットシステムの開発とプロジェクト全体のマネジメントを行い、実質の工事は、別途に設立予定のロボット施工協会に所属する工事会社が担当する。ロボットシステムの制御やメンテナンスについては、極めて高度な専門知識・技術が必要なため、既に専門のロボット関連メーカーには協力を得ることで合意を得ている。

事業展開としては、当初 2 年間程度は当社の現場において試験施工を実施し、実際の現場における課題の把握とシステムの改良を行い、次フェーズで他社の現場を含め、広くロボットシステムを普及させていく計画である。

また、アスベスト処理という社会に与える影響が大きい事業であるため、安全性・環境保全性の観点から、外部機関・行政より適時に指導・監督を受けることも必要であり、各関係方面には働きかけを行っていく予定である。

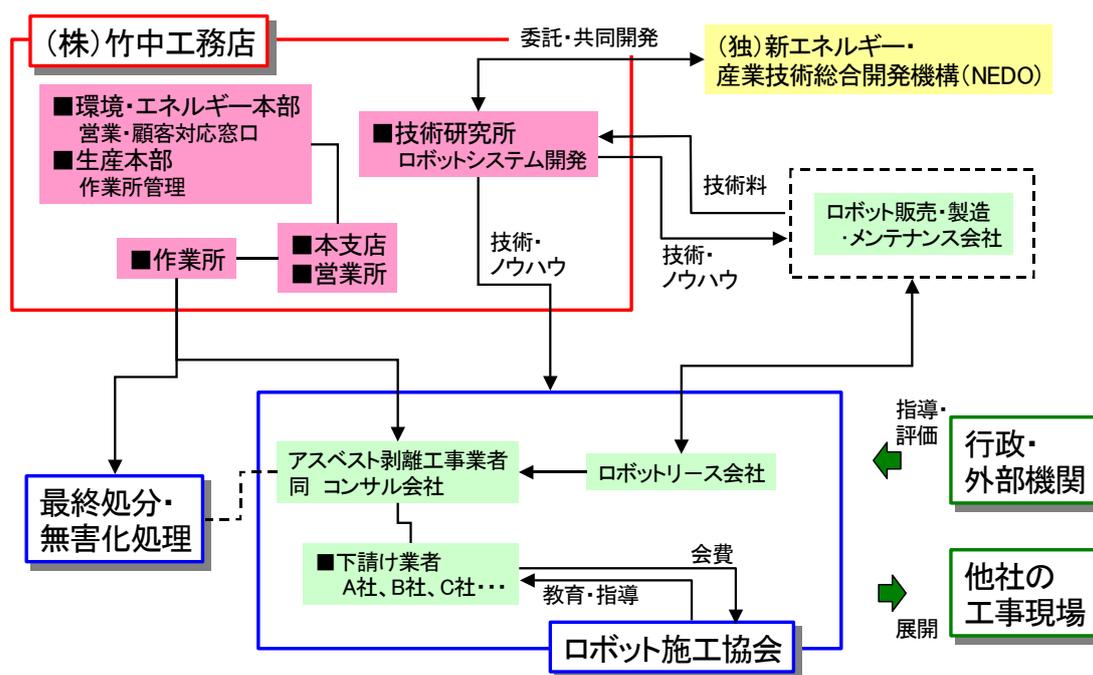


図 6.3-1 事業化体制（案）

(2) 目的に照らした達成状況

本開発では鉄骨等の複雑な形状に吹付けられた湿式吹付けアスベストを飛散させることなく、安全に剥離・回収・梱包するクローズ型処理ロボットの開発を目的として、自走式昇降台車に架装した複雑な部分にも対応可能な7自由度マニピュレータ、効率よく剥離が可能なホイールブラシを集塵カバーで覆って粉塵を飛散させることなく吸引する剥離装置および空気吸引・分離・梱包の各装置から構成される高性能アスベスト剥離・回収・梱包クローズ型処理ロボットを試作し、実証実験によりその性能を確認した。当初の目標と達成状況を以下に示す。

(a) 単位時間あたりの作業面積が従来の人手による作業の4倍以上の作業効率：

粗剥離から仕上げまで効率よく行えるホイールブラシ式の剥離装置を使用し、7軸マニピュレータをオフラインであらかじめティーチングしておき、現場では比較的簡単な操作で自動剥離を行うことで最大剥離速度 100mm/sec が得られ、剥離ロボットの設置、盛替え等を含めて人手の約4.5倍(45m²/日)の作業効率を得られた。

(b) 自動、手動による剥離作業後の剥離残しが剥離対象面積の5%以内

マニピュレータの自動剥離では対象鉄骨面積の80%程度までの剥離が可能と考えられるが、自動剥離では対応できないジョイント部やダクト周りなど残された部分について、監視カメラ映像を確認しながらジョイスティックを使用して手動遠隔操作を行うことで試算した結果、対象面積の95%までが剥離可能であることが確認された。

(c) 部分チャンバの外の環境が、ファイバ数0.1本/cm³以下

ミスト噴霧を併用し、集塵カバーで覆った剥離装置のホイールブラシで粉体状に剥離したアスベストをバキュームで直接吸引して梱包まで一貫して行う回収・梱包システムにより、全体構想(図1.2-1)に示した部分チャンバを設けなくても作業場所のファイバ本数0.079本/cm³を達成した。部分チャンバを設ければミスト併用なしで更に高い環境を得ることが可能であり、様々な現場の状況に対応することができる。

(d) 剥離したアスベストの体積を1/3以下に減容化

湿式アスベストをホイールブラシで粉体状に剥離粉碎することで、従来の人手作業によるブロック状の剥離物に比べて約1/1.9の減容化が実現できた。さらに重量含水率20%程度になるように適量な水分を加えて一軸圧縮装置で圧縮することで約1/1.6に減容化され、両方合わせることで体積比約1/3.1の減容化を達成することができた。

Ⅱ. 研究発表・講演、文献、特許等の状況

1) 研究発表・講演

- ・ 星野, 高橋, 竹内, “吹付けアスベストのクローズ型処理ロボットシステムの開発”, アーバンインフラテクノロジー推進会議, 第 19 回技術研究発表論文集 CD-ROM, 2007 年 10 月 10 日, (環境・エネルギー部門 奨励賞受賞)
- ・ 嘉本, 星野, 竹内, “吹付けアスベストのクローズ型除去ロボットシステムの開発”, 建築学会, 第 17 回建築施工ロボットシンポジウム予稿集, 2008 年 3 月 13 日
- ・ 星野, 嘉本, 菅田, 竹内, “吹付けアスベストの高機能クローズ型処理ロボットの開発”, 建設ロボット研究連絡協議会, 第 11 回建設ロボットシンポジウム論文集, 2008 年 9 月 2 日, (優秀論文賞受賞)

2) 文献

なし

3) 特許等

- ・ 特許公開 2008-190279, “吹き付け耐火被覆のクローズ型剥離処理システムおよび剥離処理工法”
- ・ 特許出願 2009-56254, “クローズ型除去処理システムの除去装置”

4) その他の公表

【新聞】

- ・ 日経新聞, 2008 年 11 月 29 日
- ・ 建設工業新聞, 建設産業新聞, 建設通信新聞, 日刊工業新聞, 2008 年 12 月 2 日

【雑誌】

- ・ 資源環境対策, 2008 年 11 月号, “吹付けアスベストの剥離・圧縮・梱包クローズ型処理ロボット”
- ・ 建築技術, 2009 年 2 月号, “遠隔操作により密閉環境でアスベストを処理する技術”